JEFFERSON CHAVES FERREIRA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE REDES EM CHIP
SEM FIO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2015

JEFFERSON CHAVES FERREIRA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE REDES EM CHIP
SEM FIO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Computação

Orientador:
Prof^a. Dr^a. Cíntia Borges Margi

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Ferreira, Jefferson Chaves

Modelagem e Simulação de Redes em Chip sem Fio / J. C. Ferreira --
versão corr. -- São Paulo, 2015.

132 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Redes em chip sem fio (Modelagem; Simulação) 2.Redes hierárquicas
3.Sistemas multinível I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe,
que sempre acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são direcionados à minha orientadora, professora Cíntia Borges Margi, por sua paciência e disciplina em me guiar neste trabalho.

Também agradeço ao professor Bruno de Carvalho Albertini pelas suas contribuições e por seus conselhos, os quais foram essenciais para o progresso desta pesquisa.

Finalmente agradeço aos membros do *Security and EMBedded systems EngineerIng group* (SEMBEI) por terem me apoiado inúmeras vezes, especialmente diante das lutas e dificuldades que se sucederam durante toda esta jornada.

RESUMO

O paradigma das redes em chip (NoCs) surgiu a fim de permitir alto grau de integração entre vários núcleos de sistemas em chip (SoCs), cuja comunicação é tradicionalmente baseada em barramentos. As NoCs são definidas como uma estrutura de *switches* e canais ponto a ponto que interconectam núcleos de propriedades intelectuais (IPs) de um SoC, provendo uma plataforma de comunicação entre os mesmos. As redes em chip sem fio (WiNoCs) são uma abordagem evolucionária do conceito de rede em chip (NoC), a qual possibilita a adoção dos mecanismos de roteamento das NoCs com o uso de tecnologias sem fio, propondo a otimização dos fluxos de tráfego, a redução de conectores e a atuação em conjunto com as NoCs tradicionais, reduzindo a carga nos barramentos. O uso do roteamento dinâmico dentro das redes em chip sem fio permite o desligamento seletivo de partes do hardware, o que reduz a energia consumida. Contudo, a escolha de onde empregar um link sem fio em uma NoC é uma tarefa complexa, dado que os nós são pontes de tráfego os quais não podem ser desligados sem potencialmente quebrar uma rota preestabelecida. Além de fornecer uma visão sobre as arquiteturas de NoCs e do estado da arte do paradigma emergente de WiNoC, este trabalho também propõe um método de avaliação baseado no já consolidado simulador ns-2, cujo objetivo é testar cenários híbridos de NoC e WiNoC. A partir desta abordagem é possível avaliar diferentes parâmetros das WiNoCs associados a aspectos de roteamento, aplicação e número de nós envolvidos em redes hierárquicas. Por meio da análise de tais simulações também é possível investigar qual estratégia de roteamento é mais recomendada para um determinado cenário de utilização, o que é relevante ao se escolher a disposição espacial dos nós em uma NoC. Os experimentos realizados são o estudo da dinâmica de funcionamento dos protocolos ad hoc de roteamento sem fio em uma topologia hierárquica de WiNoC, seguido da análise de tamanho da rede e dos padrões de tráfego na WiNoC.

Palavras-chave: redes em chip sem fio, redes hierárquicas, simulação, sistemas multinível

ABSTRACT

The network on chip (NoC) paradigm was conceived in order to allow a high-level integration among several system-on-chip (SoC) cores whose communication is traditionally based on buses. NoCs are defined as a switch structure with communication channels, which interconnect SoC Intellectual Property cores allowing data transfer among them. Wireless networks on chip (WiNoC) are an evolutionary approach from the network on chip (NoC) concept, proposing the traffic flow optimization among different modules by providing wireless shortcuts over a traditional NoC, reducing the bus load. Using dynamic routing within the WiNoC enables selective hardware power management, reducing power consumption. However, choosing where to deploy a wireless link over a NoC is a complex task given that those nodes are gateways that cannot be turned off without potentially breaking an established route. Besides providing an overview of NoC architectures and about the emerging WiNoC paradigm, this work proposes a method to use well known ns-2 network simulator to test mixed NoC-WiNoC scenarios. With this approach it is possible to evaluate different WiNoC parameters associated to routing, application and total number of nodes in hierarchical topologies. Simulation study can also point-out which routing strategy is more suitable for a given scenario, what is considered important when choosing wireless node placement over a NoC. We performed experiments to understand the dynamics of wireless ad hoc routing protocol functioning in a WiNoC hierarchical topology, followed by an analysis of network size and traffic patterns over WiNoC.

Key-words: WiNoC, simulation, network on chip, hierarchical systems, multi-level systems

LISTA DE FIGURAS

1	Estrutura de uma rede em chip.	21
2	Estrutura geral de uma topologia em malha de uma NoC	28
3	Topologias em anel	28
4	Topologias <i>butterfly</i> e <i>flattened butterfly</i>	29
5	Topologia <i>flattened butterfly</i> bidimensional	30
6	Diferenças entre topologia cúbica e <i>flattened butterfly</i>	32
7	Arquitetura de canais virtuais	33
8	Roteamento em um <i>switch</i> sem <i>buffers</i>	35
9	Arquitetura CHIPPER	39
10	Arquitetura MinBD.	40
11	Transceptor UWB	45
12	Antena zigue-zague em um substrato de 20- Ω -cm	46
13	Circuito transmissor (20-GHz) fabricado em CMOS (130nm) . . .	48
14	Chip receptor UWB	49
15	Iterações da Curva de Koch	50
16	Dipolo tapete e triângulo de Sierpinski	51
17	Antena fractal de Kumar e Gaikwad (2013)	52
18	Pacote circular e retangular de nanotubos de carbono	53
19	Comparação de resultados experimentais e de simulação	55
20	Operação básica de um nanoreceptor	56
21	Máquina de estados da plataforma de simulação	68
22	Diagrama da topologia simulada	70
23	Fluxo principal de simulação.	72

24	Exemplo de topologia com fio e sua topologia sem fio equivalente	73
25	Ilustração dos conceitos de nós em tráfego interno e externo . . .	75
26	Diagrama de componentes do simulador	79
27	Exemplo de <i>trace</i> de componente no Gem5	80
28	Arquitetura do <i>switch</i> modelado no Orion	81
29	Resultados das métricas para os três protocolos simulados . . .	85
30	Resultados das métricas para diversos <i>clusters</i>	87

LISTA DE TABELAS

1	Comparação entre barramentos tradicionais e redes em chip . . .	14
2	BLESS: políticas de priorização de pacotes	38
3	Topologias apresentadas - principais aspectos	41
4	Arquiteturas apresentadas - principais aspectos	42
5	Antenas em chip - estado da arte	65
6	Modelagem e simulação de WiNoCs - trabalhos relacionados . .	65
7	Protocolos ad hoc sem fio - principais aspectos	66
8	Plataforma de simulação - principais aspectos	82
9	Análise de resultados - pontos principais	90
10	Emprego de protocolos ad hoc sem fio em WiNoCs - pontos principais	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
API	Application Programming Interface
BER	Bit Error Rate
BLESS	Bufferless Routing Algorithm
CHIPPER	Cheap-Interconnect Partially Permuting Router
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Computer Processing Unit
DSP	Digital Signal Processing
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
FPGA	Field-Programmable Gate Array
IP	Intellectual Property
LNA	Low Noise Amplifier
PLL	Phase Locked Loop
MinBD	Minimally-Buffered Deflection
NoC	Network on Chip
ROTE	Razão de Onda de Tensão Estacionária
RNI	Resource Network Interface
SoC	System-on-Chip
SRAM	Static Random Access Memory
TCL	Tool Command Language
TCP	Transmission Control Protocol
UWB	Ultra Wide Band

USP	Universidade de São Paulo
VINT	Virtual InterNetwork Testbed
WiNoC	Wireless Network on Chip
XML	Extended Markup Language

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Método	18
1.5	Organização do documento	18
2	Aspectos gerais das redes em chip	20
2.1	Descrição funcional	20
2.2	Componentes de um <i>switch</i> de uma NoC	22
2.3	Custo de uma NoC	22
2.4	Desempenho de uma NoC	25
2.5	Topologias	26
2.5.1	Malha	27
2.5.2	<i>Small-world</i>	28
2.5.3	<i>Flattened butterfly</i>	29
2.5.4	Cúbica	31
2.6	Arquitetura Clássica	32
2.7	Arquiteturas sem <i>buffers</i>	34
2.7.1	BLESS	36
2.7.2	CHIPPER	39
2.7.3	MinBD	40
2.8	Sinopse	41

3	Emprego de redes sem fio em NoCs	43
3.1	Abordagens de transmissão sem fio	43
3.1.1	O emprego de <i>Ultra Wide Band</i>	44
3.1.2	Antenas zigue-zague	46
3.1.3	Antenas fractais	50
3.1.4	Nanotubos de carbono	52
3.2	Trabalhos relacionados de transmissão sem fio aplicada a redes em chip	57
3.3	Uso de protocolos de roteamento dinâmico para a economia de energia	62
3.4	Protocolos ad hoc de roteamento sem fio	63
3.5	Sinopse	64
4	Plataforma de simulação	67
4.1	Modelagem	71
4.1.1	Fluxo principal da plataforma de simulação	71
4.1.2	Parâmetros	73
4.1.3	Métricas	75
4.1.4	Algoritmo de convergência	76
4.2	Desenvolvimento	77
4.3	Sinopse	81
5	Experimentos e análise de resultados	83
5.1	Desempenho de protocolos	83
5.1.1	Perfis de tráfego interno e externos	84
5.1.2	Tamanho da rede e número de saltos	86
5.2	Empregando protocolos ad hoc sem fio em WiNoCs	88

5.3 Sinopse	89
6 Considerações Finais	91
6.1 Publicações	92
6.2 Trabalhos futuros	92
Referências	94
Apêndice A - Exemplo de script da simulação com fio	101
Apêndice B - Exemplo de script de simulação sem fio	114
Apêndice C - Exemplo para os parâmetros de entrada	123
Apêndice D - Código fonte das abordagens de convergência	125

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas em chip (SoCs - *System on Chip*) são definidos como um conjunto de componentes eletrônicos acoplados em um único dispositivo o qual possui função dedicada (WILTON; SALEH, 2001). Não são raras as vezes em que tais componentes necessitam de recursos de comunicação. Portanto lidando-se com um contexto de miniaturização de componentes, de uso de sistemas embarcados dotados de sensores e do seu emprego em aplicações distribuídas, há uma demanda por sistemas de comunicação que sejam compatíveis com tais requisitos e que suportem uma comunicação complexa. Visando a substituição da infraestrutura de comunicação tradicional dos SoCs baseada em barramentos, as redes em chip (NoCs - *Network on Chip*) emergem como um novo paradigma cujo alvo é a melhoria do desempenho da comunicação entre os núcleos embarcados fornecendo uma plataforma de comunicação escalável e que possa ser reutilizada em um grande número de SoCs (BENINI; MICHELI, 2002). A Tabela 1 compara os barramentos tradicionais com o paradigma das redes em chip, destacando as vantagens desta nova abordagem de comunicação distribuída sobre a comunicação tradicional.

Uma NoC é definida como uma estrutura de *switches* e canais ponto-a-ponto que interconectam núcleos de um sistema, provendo uma plataforma de comunicação entre eles. Os dados são transmitidos pela rede na forma de pacotes, que podem ser quebrados em unidades menores, denominadas *flits*, as quais são efetivamente transportadas segundo uma arquitetura e um protocolo específico.

No que tange ao seu emprego em sistemas embarcados, superfície e consumo de energia são primordiais. Dessa forma deve-se privilegiar o emprego de arquiteturas de *switches* mais simples e econômicas. De acordo com Moscibroda e Mutlu (2009) consegue-se reduzir o consumo energético e a su-

Tabela 1: Comparação entre Barramentos tradicionais e Redes em Chip. O sinal "+" identifica uma vantagem ao passo que o sinal "-" identifica uma desvantagem.

Barramentos Tradicionais vantagens e desvantagens		Redes em Chip vantagens e desvantagens
Cada IP anexada adiciona capacitância parasita, portanto o desempenho elétrico se degrada com o aumento de IPs.	- +	Somente ligações únicas ponto-a-ponto empregando fios são usadas, independente da escala da rede.
Sincronização de barramentos é um processo submicrônico profundo.	- +	As ligações da rede podem ser dispostas em pipeline por possuírem protocolos assíncronos.
Testes envolvendo os barramentos são complexos e lentos.	- +	Testes locais dedicados de interfaces são mais rápidos e oferecem boa cobertura.
O atraso da arbitragem aumenta com o número de IPs.	- +	As decisões de roteamento são distribuídas.
A arbitragem do barramento é específica para cada instância de SoC.	- +	O mesmo <i>switch</i> pode ser instanciado para todos os tamanhos de rede.
A capacidade de transmissão de dados é limitada e compartilhada por todas as IPs conectadas ao barramento.	- +	A capacidade de transmissão de dados aumenta com a escala da rede.
Dado que uma IP tenha acesso ao barramento, sua latência é somente o atraso relacionado à transmissão de dados.	+ -	Mecanismos internos de contenção de rede podem originar latência.
Barramentos ocupam pouca superfície em hardware.	+ -	Dependendo da topologia, as redes podem ocupar maior superfície em hardware.
Qualquer barramento é, via de regra, diretamente compatível com a maioria das IPs, disponíveis como também com o software empregado nas CPUs.	+ -	IPs orientadas à barramentos necessitam de <i>wrappers</i> . O software das IPs necessita de sincronização em sistemas multiprocessados.
Os conceitos são simples e bem disseminados.	+ -	Os projetistas de sistemas necessitam reeducar-se para assimilar novos conceitos.

Adaptado de: Guerrier e Greiner (2000)

perfície de um componente em até 40% por meio de redes de *switches* sem *buffers*.

Ogras, Hu e Marculescu (2005) enumeram alguns exemplos de problemas relevantes em NoCs, tais como o desenvolvimento de topologias eficientes que sejam capazes de conciliar desempenho, miniaturização e simplicidade de projeto, a concepção de mecanismos de gerenciamento de filas, a questão do tamanho de canal, a questão da existência ou não de *buffers* e seu impacto na superfície e latência da rede, que demonstram o potencial de desenvolvimento de pesquisas nesta área do conhecimento.

As redes em chip são uma parte integral do projeto de um SoC e de sua respectiva arquitetura, o que incentiva um vasto espaço de opções de implementação e de decisões a serem tomadas. Portanto com o objetivo de obter resultados otimizados, a modelagem e a simulação tornam-se primordiais para uma concepção e um fluxo de desenvolvimento bem-sucedido. A partir deste cenário, pesquisas envolvendo metodologias de projeto e modelos comportamentais de tráfego capazes de relacionar a dinâmica do sistema com os requisitos de redes em chip são desejadas e necessárias para a consolidação deste novo paradigma.

1.1 Motivação

Com a evolução da tecnologia de radiofrequência, as redes em chip dotadas de características sem fio despontam como indutoras do aumento de desempenho e escalabilidade das redes em chip. Numerosas arquiteturas de semicondutores metal óxido complementares (CMOS) empregando antenas (dipolo e *loop*), por exemplo, foram desenvolvidas com resultados promissores (O. *et al.*, 2005) ¹. Tais arquiteturas podem ser aplicadas em mecanismos propagadores de sinais de relógio ou de barramento de controle (FLOYD, 2001), ser utilizadas em mecanismos de redução de conectores (WU; WANG; ZHAO, 2010) e até mesmo atuar em conjunto com as redes em chip tradicionais na transmissão de informações (ZHAO; WU, 2012).

O uso da tecnologia *Ultra Wide Band* (UWB) associada ao emprego de

¹Dr. Kenneth Kyongyop O

antenas zigue-zague, às antenas fractais ou mesmo às compostas por nanotubos de carbono despontam como potenciais candidatos ao uso em WiNoCs. Isto abre a possibilidade para antenas de tamanho reduzido, e seu consequente uso em arquiteturas de hardware para redes em chip.

A análise de desempenho do emprego de mecanismos de radiotransmissão proposta por Deb *et al.* (2012) demonstra que as arquiteturas em chip sem fio possuem um desempenho significativamente superior quando comparadas com as arquiteturas hierárquicas com fio equivalentes. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de análises mais detalhadas a respeito das arquiteturas dos circuitos e dos pontos críticos no emprego das redes sem fio em NoCs.

Além destes aspectos, a tecnologia sem fio em NoCs ainda é incipiente. Não há muitos estudos a respeito do emprego de protocolos ad hoc de redes sem fio, como o DSR (JOHNSON; MALTZ, 1996), o DSDV (PERKINS; BHAGWAT, 1994) ou o AODV (PERKINS; ROYER, 1999), apesar das similaridades dos requisitos em seu emprego tais como a dinâmica de auto-organização e controle de congestionamento de tráfego. Dessa forma, este trabalho inclui um estudo comparativo detalhado a respeito do funcionamento dos protocolos de rede sem fio destinado a saber qual paradigma de protocolo de roteamento é o mais indicado para o uso em roteamento sem fio em NoCs tanto em abordagens intra chip quanto na comunicação externa.

Diante de um contexto de busca de melhores abordagens que conciliem o tempo de resposta, o consumo energético e a área ocupada por uma NoC, este trabalho tem como principal motivação um estudo inicial a respeito de topologias e arquiteturas as quais podem ser utilizadas com a combinação de redes sem fio com NoCs (WiNoCs). Trata-se da especificação de uma rede mista, adaptativa e auto gerenciável que busque a conexão de diversos dispositivos embarcados como sensores e coprocessadores para a realização de uma determinada macro tarefa.

As aplicações deste tipo de rede são variadas. Tal dispositivo pode ser utilizado como rede de comunicação para casas inteligentes, como também em dispositivos de comunicação não vitais em automóveis e até mesmo em aeronaves (MOTAMEDI *et al.*, 2009).

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é a análise da dinâmica de funcionamento de redes em chip sem fio (WiNoC) por meio do emprego de uma topologia hierárquica dividida *clusters*, a partir de uma abordagem evolucionária do estado da arte da pesquisa em WiNoCs. Para isto foi projetada e desenvolvida uma plataforma de simulação baseada no simulador ns-2 (ISI, 2011b), na qual é possível a análise do desempenho dos *switches* e da dinâmica de funcionamento de redes em chip sem fio em diversos cenários experimentais.

A análise se estende acerca de quais paradigmas de protocolos de roteamento ad hoc de redes sem fio possuem melhores resultados quando aplicados a redes em chip sem fio como também nos efeitos de diferentes perfis de tráfego e tamanhos de rede no desempenho geral da topologia. Outro aspecto importante desta análise é o uso do paradigma de protocolos de roteamento dinâmico a fim de realizar economia de energia e os procedimentos para o uso dos protocolos de roteamento ad hoc sem fio em WiNoCs vislumbrando sua implementação em redes em chip sem fio hierárquicas.

1.3 Justificativa

O paradigma de redes em chip sem fio necessita de investigações extensivas para tornar-se uma alternativa viável para as infraestruturas de conexão existentes (DEB *et al.*, 2012). Na maioria dos trabalhos na literatura, os mecanismos de avaliação das arquiteturas de NoCs e WiNoCs são baseados em simuladores próprios, o que gera dificuldades na hora de realizar comparações. Dessa forma, este trabalho propõe o uso de um simulador consagrado como o ns-2 (ISI, 2011b) como base para a simulação de redes em chip sem fio provendo uniformidade na avaliação dos agentes, arquiteturas e protocolos de roteamento.

Além disso, os estudos relacionados à camada física em WiNoCs direcionam-se para prover capacidades sem fio plenas em qualquer nó sem fio. Por outro lado, a radiotransmissão é ainda custosa em termos de consumo de energia o que incentiva os pesquisadores a elaborar estudos a respeito da

complexidade dos *switches* e acerca das dinâmicas de rede, a fim de minimizar os custos enquanto se mantém um desempenho aceitável para a rede.

1.4 Método

A metodologia adotada consiste na concepção de uma plataforma de simulação baseada no simulador de redes ns-2 (ISI, 2011b). O uso deste simulador como base para a plataforma de simulação de WiNoCs abre a possibilidade para a elaboração de estudos acerca da modelagem da dinâmica de comunicação dos nós em rede com foco, não somente na arquitetura do *switch*, como também nos impactos da topologia e dos protocolos de roteamento no desempenho geral da rede.

Por meio desta plataforma de simulação foram realizados dois grupos de experimentos em uma topologia de WiNoC hierárquica. O primeiro grupo analisa a dinâmica funcionamento e desempenho de um conjunto de três protocolos de redes ad hoc sem fio em diversos cenários de tráfego interno e externo. O segundo grupo analisa os efeitos da variação do tamanho da rede e de diferentes perfis de tráfego no desempenho da WiNoC.

É interessante ressaltar que, por questões de complexidade, alguns conceitos das redes sem fio tradicionais relacionados ao roteamento dinâmico ou ao acesso ao meio levarão algum tempo para chegar às WiNoCs em sua completude, contudo é possível prospectar aspectos importantes a partir de simulações tais como o comportamento dos paradigmas de roteamento (reativo ou ativo) usados nos protocolos de redes sem fio, os mecanismos de acesso ao meio e a proporção de nós dotados de canais sem fio no total da rede. Estes aspectos dão uma contribuição significativa para o projeto em chip de WiNoCs além de fornecer aspectos importantes em um cenário de co-simulação.

1.5 Organização do documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

- O **capítulo 2** apresenta os conceitos teóricos essenciais ao entendi-

mento deste trabalho, necessários para a contextualização do tema. Destacam-se os cálculos de custo (seção 2.3) e de desempenho (seção 2.4) de uma NoC, as topologias mais frequentes (seção 2.5) e as arquiteturas de *switches* com *buffers* (seção 2.6) e sem *buffers* (seção 2.7);

- O **capítulo 3** apresenta uma visão geral acerca do estado da arte na concepção de antenas em chip (seção 3.1) além de elucidar algumas abordagens e conceitos relevantes para a modelagem e simulação de redes em chip sem fio (seções 3.2 e 3.3);
- O **capítulo 4** especifica os aspectos necessários para a simulação de topologias hierárquicas de redes em chip sem fio, apresentando toda a metodologia e as técnicas utilizadas para medir seu desempenho;
- O **capítulo 5** especifica os experimentos realizados neste trabalho e analisa os resultados obtidos em cada um deles. Há também uma análise de como implementar os protocolos estudados neste trabalho em hardware visando o uso em WiNoC na seção 5.2;
- Finalmente o **capítulo 6** apresenta as conclusões originadas por este trabalho bem como a descrição dos trabalhos futuros a serem tomados para a continuidade e consolidação total deste trabalho de pesquisa.

2 ASPECTOS GERAIS DAS REDES EM CHIP

Este capítulo tem como objetivo especificar os principais fatores que servem como base para a compreensão do funcionamento e da metodologia de avaliação das redes em chip. Inicia-se com uma descrição dos principais componentes e estruturas de uma NoC (seções 2.1 e 2.2), seguida de métodos para avaliação de seu custo e desempenho (seções 2.3, 2.4) e também da descrição de topologias (seção 2.5) e arquiteturas (seções 2.6 e 2.7) relevantes. Finalmente encerra-se o capítulo com a sinopse das topologias e arquiteturas discutidas (seção 2.8).

2.1 Descrição funcional

Uma arquitetura em chip é um arranjo de **switches** e **recursos** posicionados em *slots* conectados pelos *switches*.

Um recurso é definido como um módulo de Propriedade Intelectual (IP - *Intellectual Property*) o qual possui uma função específica. Exemplos de recursos são processadores, memórias, FPGAs, hardware customizado ou qualquer outro módulo que possibilite sua inserção nos *slots* da NoC. Cada recurso possui acesso a pelo menos um *switch*.

Os *switches* são conectados a recursos e a outros *switches* vizinhos. A comunicação interna dos recursos é síncrona e os mesmos devem ser capazes de se comunicar com a NoC por meio de uma interface da rede de recursos (RNI - *Resource Network Interface*). Tal interface possui quatro níveis (KUMAR *et al.*, 2002):

- A camada física, que determina o número de fios conectando recursos e *switches*;

- A camada de transferência de dados, a qual define o protocolo para transmitir uma unidade de dados entre um recurso e um *switch* ou entre dois *switches*. Tanto a camada física quanto a camada de transferência de dados são dependentes da topologia. Portanto, para cada nova geração tecnológica, estas duas camadas são definidas;
- A camada de rede define como um pacote ou *flit* (divisão de um pacote) é transferido pela rede a partir de um emissor arbitrário para um receptor arbitrário direcionado por seu respectivo endereço. Esta camada é dependente da tecnologia empregada;
- A camada de transporte também é dependente de tecnologia. O tamanho da mensagem pode ser variável. A RNI deve empacotar as mensagens da camada de transporte em pacotes da camada de rede.

Figura 1: Estrutura de uma rede em chip.

Fonte: Kumar *et al.* (2002)

A Figura 1 ilustra os componentes principais de uma NoC: “S” são os *switches*, “RNI” são os módulos de interface da rede de recursos, “P” são os núcleos de processamento, “D” são os núcleos de processamento de sinais, “M” ilustra a memória, “c” ilustra o cache e “re” são os blocos reconfiguráveis.

2.2 Componentes de um *switch* de uma NoC

Em uma NoC os *switches* são componentes os quais possuem destaque. Eles são responsáveis por gerenciar e encaminhar os *flits* possibilitando a comunicação entre os diversos recursos da rede. Apesar da diversidade de arquiteturas de *switches*

(FALLIN; CRAIK; MUTLU, 2011; MOSCIBRODA; MUTLU, 2009; FALLIN *et al.*, 2012) a maior parte deles possuem componentes em comum, a saber (KIM, 2009):

- *Crossbar* - é a parte do *switch* a qual regula o redirecionamento dos *flits* das portas de entrada para as portas de saída. Em arquiteturas convencionais (seção 2.6) seu impacto na superfície do circuito pode chegar a 64% da superfície total do *switch* (KIM, 2009). Suas dimensões no circuito são de $O(p^2w^2)$ onde p é o número de portas do *switch* e w é o comprimento do *datapath*;
- Arbitragem - é o módulo no qual estão os controles para a comunicação do recurso com a rede. Dessa forma, uma parte significativa da latência é determinada pelos mecanismos de arbitragem;
- *Buffers* - são componentes utilizados como mecanismos de simplificação do controle do fluxo de tráfego já que podem armazenar uma quantidade limitada de *flits* em seu interior. Contudo os *buffers* representam uma porção significativa da área e da energia de um *switch* de uma rede em chip sem fio (MOSCIBRODA; MUTLU, 2009). Diante do impacto dessas estruturas, além das arquiteturas baseadas na existência de *buffers* surgem as redes em chip sem *buffers* (seção 2.7), as quais utilizam mecanismos de deflexão de *flits* no caso de disputas para o uso do mesmo canal no mesmo intervalo de tempo.

2.3 Custo de uma NoC

O custo de uma rede em chip pode ser traduzido em duas principais dimensões: a da energia consumida pela arquitetura e a superfície no chip ocupada pela mesma.

O consumo energético dos *switches* de uma NoC é diretamente relacionado com sua arquitetura, sendo que os *buffers* possuem um papel significativo neste quesito. Segundo Kumar *et al.* (2007), os *buffers* podem responder por até 46% do consumo energético da NoC. O segundo maior consumo energético provém do *crossbar*, o qual responde por até 34% da energia consumida, evidenciando a atenção que deve ser dada a estes componentes em um projeto de uma nova arquitetura de rede em chip. O consumo energético também é influenciado pelo perfil de tráfego ao qual a NoC é submetida. Perfis de tráfego que impliquem em maior número de saltos entre nós, por exemplo, exigem maior energia para que a transmissão seja executada. Para estimar-se a energia de uma NoC é necessário mapear o perfil dos caminhos seguidos pelos *flits* na rede e, a partir dessa informação, somar a energia consumida por cada um dos caminhos conforme as equações 2.1 a 2.4 (GROT *et al.*, 2009):

$$E_{links_j} = E_{fio_{mm}} \cdot w \cdot \sum_{i=1}^{H_j} \delta_i \quad (2.1)$$

$$E_{switches_j} = \sum_{i=1}^{H_j} (E_{buffers} + E_{crossbar} + E_{arbitragem}) \quad (2.2)$$

$$E_{caminho_j} = E_{links_j} + E_{switches_j} \quad (2.3)$$

$$E_{NoC} = \sum_{j=1}^F E_{caminho_j} \cdot n_j \quad (2.4)$$

Onde:

$E_{fio_{mm}}$: energia por milímetro de fio

w : largura do canal (mm)

δ_i : comprimento do fio por salto (mm)

H_j : total de saltos de um determinado percurso

$E_{buffers}$: contribuição energética dos *buffers* para um salto

$E_{crossbar}$: contribuição energética do *crossbar* para um salto

$E_{arbitragem}$: energia do componente de arbitragem para um salto

F : número total de fluxos de tráfego dos *flits* de uma NoC

n_j frequência de um determinado fluxo de tráfego em uma NoC

No quesito da área, os *buffers* também são responsáveis por uma parte significativa do circuito chegando a ocupar até 17% da superfície total de um *switch* para abordagens baseadas em SRAM. Arquiteturas de *switches* com *buffers* baseados em *flip-flop* possuem até 51% de sua área total ocupada pelos *buffers* (KIM, 2009). Como a lógica de controle não possui peso significativo na área da NoC, a área de uma rede em chip pode ser estimada conforme equações 2.5 a 2.7 (GROT *et al.*, 2009):

$$A_{links} = A_{fio_{mm}} \cdot w \cdot \sum_{i=1}^C \delta_i \quad (2.5)$$

$$A_{switches} = (A_{buffers} + A_{crossbar} + A_{arbitragem}) \cdot N \quad (2.6)$$

$$A_{NoC} = A_{links} + A_{switches} \quad (2.7)$$

Onde:

$A_{fio_{mm}}$: Área ocupada por milímetro de fio

w : largura do canal (mm)

δ_i : comprimento do canal (mm)

C : total de canais em um *switch*

N : número de *switches*

$A_{buffers}$: área dos *buffers*

$A_{crossbar}$: área do *crossbar*

$A_{arbitragem}$: área do componente de arbitragem

2.4 Desempenho de uma NoC

O desempenho de uma rede em chip pode ser medido por meio de dois parâmetros: o *throughput* e a latência.

O *throughput*, ou vazão, é definido como a taxa média de entregas bem sucedidas em um canal de comunicação em um intervalo de tempo, geralmente curto, tendendo a zero. Unidades comuns de *throughput* são bits por segundo, pacotes por segundo ou *flits* por segundo. Dessa forma, maior *throughput* implica em uma maior velocidade de entrega de pacotes. O *throughput* médio de uma NoC pode ser definido pela equação 2.8:

$$Tr_{NoC} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{T}}{N} \quad (2.8)$$

Onde:

N : número de *switches*

n_i : número de *flits* que percorrem o *switch* i

T : tempo de avaliação

A latência de uma rede em chip é definida como o intervalo de tempo no qual um pacote (ou *flit*) leva para chegar ao seu destinatário em uma determinada arquitetura. Associada com o *throughput*, é uma métrica decisiva na hora de avaliar o desempenho de uma rede sem fio. A latência de um pacote de uma NoC pode ser calculada por meio da equação 2.9, adaptado de Kim, Balfour e Dally (2007):

$$T = T_h + T_s + T_w = H.t_r + \frac{L}{b}.t_s + T_w \quad (2.9)$$

Onde:

T_h : latência de cabeçalho

T_s : latência de serialização

T_w : latência de transmissão

H : número de saltos

t_r : tempo de roteamento

t_s : soma dos tempos de serialização e deserialização

L : tamanho do pacote

b : largura do canal

No contexto de simulação de dinâmicas de comunicação em rede, outro parâmetro relevante para o desempenho da rede é o atraso médio, o qual mede o tempo médio que os *flits* dispendem para chegar às suas respectivas destinações. O cálculo consiste na soma do tempo levado por cada pacote para chegar ao seu destino (equação 2.9) em todos os fluxos de tráfego da NoC dividido pelo número total de fluxos de tráfego, calculado conforme a equação 2.10:

$$T_{NoC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{flows}} \sum_{j=1}^{np_{flow_i}} T_{flow_{ij}}}{N_{flows}} \quad (2.10)$$

Onde:

N_{flows} : número de fluxos de tráfego

np_{flow_i} : número de *flits* que percorrem um fluxo de tráfego i

$T_{flow_{ij}}$: tempo dispendido para o *flit* j percorrer o fluxo de tráfego i

2.5 Topologias

Outro aspecto relevante em uma arquitetura de NoC é a topologia estabelecida pelos *switches*. Uma topologia é definida como a disposição espacial dos nós em uma rede. No caso de redes em chip, as topologias buscam aproveitar o máximo da superfície do hardware. Há também topologias que buscam aumentar o número de conexões entre os nós com o intuito de diminuir o número de saltos na rede, reduzindo consequentemente a latência da NoC. Por outro lado, redes complexas combinadas com as restrições impostas por

substratos planares de silício afetam significativamente a escolha de uma topologia para NoCs. Topologias de dimensões simples, como anel ou malhas dimensionais, são interessantes para uso em NoCs já que a regularidade de suas estruturas e a baixa complexidade de seus *switches* combinam com o processo de síntese de circuitos em hardware. Topologias mais complexas podem ter sua escalabilidade limitada, além do risco de sua síntese possuir canais com comprimentos exagerados, o que pode impactar negativamente na latência de transmissão, no consumo energético e na forma na qual os diversos módulos serão alocados na plataforma de hardware.

A fim de propiciar maior escalabilidade e diminuir a complexidade das topologias surge o conceito de concentração k , o qual pode ser traduzido como o número de nós por *switch* da rede. Uma NoC mais concentrada é aquela na qual é possível acessar mais recursos com um menor número de transições na rede, o que reduz também a complexidade das ligações entre seus diversos elementos. As seções a seguir enumeram e especificam as topologias mais encontradas nas redes em chip.

2.5.1 Malha

A Figura 2 ilustra a topologia mais frequentemente adotada nas redes em chip (NYCHIS *et al.*, 2012). Um conjunto de *switches* e ligações ponto-a-ponto que os interconectam é organizada segundo uma estrutura em malha. Cada *switch* possui alguns módulos de IPs que são responsáveis pela execução das tarefas. Estas tarefas, executadas em diferentes IPs, comunicam-se por meio da interconexão em chip na qual há, em cada direção, dois canais unidirecionais para cada sentido.

O mecanismo de gestão das interconexões utiliza a técnica dos canais virtuais (seção 2.6), a qual desacopla a alocação de recursos provendo múltiplos *buffers* para cada ligação física na rede (DALLY, 1992). Cada um destes *buffers* é considerado um canal virtual e é capaz de armazenar um ou mais *flits* de um pacote.

Figura 2: Estrutura geral de uma topologia em malha de uma NoC

2.5.2 *Small-world*

As redes organizadas em uma topologia *small-world* possuem um número médio de saltos relativamente pequeno. O caminho médio é da ordem de $\log N_{sw}$, onde N_{sw} são os nós envolvidos na topologia e, dessa forma tal organização torna-se atrativa para a implantação de topologias em NoCs com número elevado de nós (GANGULY *et al.*, 2011a). A Internet e as redes sociais, por exemplo, exibem propriedades modeláveis por *small-world* (WATTS; STROGATZ, 1998).

Figura 3: A Figura (a) ilustra uma topologia em anel. As outras três Figuras ilustram exemplos de redes *small-world* para um (b), três (c) e quatorze (d) atalhos.

Adaptado de Ganguly *et al.* (2011a)

A topologia *small-world* pode ser construída a partir de uma topologia em anel (Figura 3-a) por meio da especificação de conexões entre os nós de tal forma que se criem atalhos. Tais conexões podem seguir distribuições probabilísticas parametrizadas por parâmetros como, por exemplo, a distância entre

os nós da topologia em anel inicial. Ainda segundo Ganguly *et al.* (2011a), estes atalhos permitem melhorar significativamente o desempenho em comparação às redes em malhas tradicionais e com menos recursos que um sistema totalmente interconectado.

2.5.3 Flattened butterfly

A topologia *flattened butterfly* é uma abordagem evolutiva da topologia *butterfly*. Tal nome advém da forma das interconexões entre os *switches* a qual se assemelham às asas de uma borboleta (Figura 4-a). Na Figura 4 também há a ilustração do processo de derivação de uma topologia *flattened butterfly* a partir de uma topologia *butterfly*.

Figura 4: Diagrama de blocos de uma topologia *butterfly* de uma dimensão e $k=4$ (a) e a topologia *flattened butterfly* correspondente (b). Em (c) há uma topologia *butterfly* de 3 dimensões e $k=2$ e sua topologia *flattened butterfly* correspondente está em (d).

Fonte: Kim, Dally e Abts (2007)

A partir de uma topologia *butterfly* tradicional, combina-se os roteadores em cada linha em um único roteador. A Figura 4-a ilustra a combinação dos *switches* R0 e R1, destacados na parte superior da topologia em *butterfly*, em um único *switch* R0' da topologia *flattened butterfly* (Figura 4-b). De maneira similar os roteadores R0, R1, R2 e R3 da Figura 4-c são combinados em R0' na Figura 4-d. Os canais entre os *switches* agrupados em cada linha são eliminados. Os outros canais são mantidos na topologia *flattened butterfly*. Por exemplo, o canal R0-R7 na Figura 4-a é equivalente ao canal R0'-R3' da

Figura 4-b. É importante ressaltar que os canais das topologias *butterfly* nas Figuras 4-a e 4-c são unidirecionais ao passo que os canais das topologias *flattened butterfly* nas Figuras 4-b e 4-d são bidirecionais.

A topologia *flattened butterfly* busca primordialmente a redução do número de saltos na troca de informações entre os recursos da rede em chip. Nos casos mais simples há somente dois saltos na comunicação entre dois recursos. Trata-se de uma topologia a qual pode ser combinada com *switches* dotados de um elevado número de portas de troca de dados. A redução do número de saltos é acompanhada pela redução do consumo energético e da latência. Por outro lado, na topologia *flattened butterfly*, os caminhos percorridos são maiores dos que o da topologia em malha. As perdas de desempenho por conta do tamanho dos fios da topologia em *butterfly* são compensadas por meio da adoção de repetidores e de registradores de *pipeline* a fim de preservar a integridade do canal (KIM; BALFOUR; DALLY, 2007). A Figura 5 esquematiza uma topologia *flattened butterfly* bidimensional.

Figura 5: Topologia *flattened butterfly* bidimensional . Em (a) o diagrama de blocos e em (b) a sua respectiva representação espacial.

Fonte: Kim, Balfour e Dally (2007)

Sabe-se que o consumo de energia dos canais possui papel significativo no consumo geral da NoC. Dessa forma, a redução dos números de canais também reduz o custo da rede. Assim o uso de redes dotadas de *switches* com número de portas e concentração k elevados, adotando a topologia *flattened butterfly*, leva à redução dos canais, que por sua vez diminui o diâmetro da rede, e consequentemente reduz a quantia de *buffers* necessários para o estabelecimento da NoC.

Outros mecanismos de otimização presentes na topologia *flattened butterfly* são o uso de canais de *bypass* com mecanismos de arbitragem dotados de priorização para fluxos de tráfego pré-definidos, e controle de fluxo por meio do armazenamento seletivo dos pacotes de controle.

2.5.4 Cúbica

Diante dos empecilhos relacionados à escalabilidade das redes em *flattened butterfly* por conta do número proibitivo de canais para um elevado número de *switches*, são propostas as topologias cúbicas baseadas em multicanais expressos - MECS (GROT *et al.*, 2009). Trata-se de uma abordagem baseada nas topologias cúbicas tradicionais (DALLY, 1991), mas que possuem canais que se comunicam com diversos destinos (ao invés de somente um como na topologia em *flattened butterfly*). As MECS mantêm o número máximo de saltos igual ao da topologia em *butterfly*, contudo, diminuem sensivelmente a complexidade das ligações entre os *switches*. A Figura 6 ilustra as principais diferenças entre as duas topologias.

As redes cúbicas possuem as seguintes propriedades:

- o número de canais por cada coluna ou linha é igual à raiz da rede, r ;
- o número de nós acessíveis por meio de um canal é função da localização do nó origem na rede e varia de 1 a $r - 1$;
- cada nó possui uma saída por direção da mesma maneira que a topologia em malha;
- o número de entradas é $2(r - 1)$ o mesmo da topologia em *flattened butterfly*.

Figura 6: Principais diferenças entre a topologia em *flattened butterfly* (a) e a topologia cúbica com multicanais (b). As duas topologias da Figura possuem $k=4$ (quatro nós agrupados em cada *switch* da rede).

Fonte: Grot *et al.* (2009).

2.6 Arquitetura Clássica

A topologia de NoC mais frequente é a em malha (NYCHIS *et al.*, 2012) e, segundo Craik e Mutlu (2011), muito do trabalho de roteamento em redes em malha foi baseado na ideia de *switches* com canal virtual originalmente proposto por Dally (1992). Por conta da possibilidade de dois *flits* requisitarem a mesma ligação para chegar ao seu destino, o *switch* primeiro armazena os *flits* em *buffers* e, após verificar disponibilidade, os envia para suas respectivas ligações. Isto soluciona o problema de conflitos por recursos entre diferentes fluxos de tráfego, já que se um *switch* não possuir mais espaço para armazenar os dados dos fluxos que requisitam determinada ligação de saída, ele pode informar os *switches* emissores de tais fluxos os quais serão responsáveis pela contenção temporária do envio destas informações.

Com o objetivo de assegurar o controle da transmissão de pacotes, um esquema de atribuição e de arbitragem de prioridades torna-se necessário. Dessa forma combina-se tal mecanismo com a técnica dos canais virtuais para que os pacotes sejam transmitidos em tempo hábil. Cada canal virtual atende a um nível de prioridade e é direcionado a um canal físico. Os fluxos de tráfego possuem prioridades associadas a eles. Cada *flit* gerado por um fluxo herda a sua prioridade e pode requisitar os canais virtuais que possuem

a mesma prioridade. O pacote mais prioritário sempre tem acesso ao canal físico e pacotes com prioridades superiores são capazes de ultrapassar pacotes com menores prioridades interrompendo seus fluxos de transmissão. A Figura 7 ilustra o mecanismo de prioridades.

Figura 7: Esquema de decisão de acesso a um canal físico utilizando a técnica de canais virtuais.

Fonte: Shi e Burns (2008)

Considerando n canais virtuais (no caso de redes em malha $n \geq 2^b; b \in \mathbb{N} \wedge b > 1$), cada um é associado a um canal físico contendo *flits*. O mecanismo de gestão de prioridades ajusta os *flits* em cada *buffer* de acordo com suas respectivas prioridades. Se um determinado pacote não consegue acessar o canal de saída é porque ele está bloqueado em algum ponto da rede. Diante deste cenário o pacote com a prioridade posterior ao pacote bloqueado consegue acessar o canal físico. O tempo de serviço disponível para um determinado fluxo de tráfego é definido como o intervalo de tempo no qual tal fluxo não compete por um mesmo canal físico com pacotes de prioridades superiores.

No caso do roteamento em pacotes (que são divididos em *flits*) os canais virtuais empregam a técnica de roteamento em *wormhole* (NI; MCKINLEY, 1993). Nas redes do tipo *wormhole* os dados são encapsulados em um formato de pacote para transmissão em rede. Cada pacote é dividido em um número fixo de *flits*. O *flit* de cabeçalho contém os dados de roteamento e é

responsável por decidir a rota do pacote. À medida que o *flit* de cabeçalho avança, segundo um caminho específico, os *flits* restantes o seguem em *pipeline*. Ao encontrar uma ligação entre *switches* em uso, o *flit* de cabeçalho é bloqueado até que tal ligação esteja disponível. Nesta situação todos os *flits* do pacote permanecerão no *switch* e, dessa forma, um *buffer*, cujo tamanho equivale ao de um pacote, é necessário em cada *switch*. Quando um pacote é bloqueado, diminuem-se os recursos disponíveis para os outros pacotes e a eficiência da rede é afetada.

2.7 Arquiteturas sem *buffers*

As arquiteturas clássicas assumem comumente que cada *switch* na rede contém *buffers* a fim de armazenar os pacotes ou *flits* transmitidos dentro da rede. É sabido que tal armazenamento reduz o número de *flits* perdidos e melhora a capacidade da rede de entregar os pacotes nas rotas corretas. Por outro lado, a existência de *buffers* também possui algumas desvantagens. A primeira é o consumo energético significativo de tais módulos mesmo quando não ocupados. A segunda consiste no impacto dos *buffers* na área ocupada pelo circuito e também na necessidade de estruturas lógicas de controle para seu correto funcionamento, o que aumenta a complexidade da NoC (MOSCI-BRODA; MUTLU, 2009).

Diante de tais circunstâncias as redes em chip sem *buffers* apresentam-se como uma alternativa à arquitetura clássica. As tradicionais filas de armazenamento de pacotes dão lugar a uma abordagem na qual as próprias ligações da rede atuam como uma entidade de armazenamento. Quando há concorrência dos pacotes por uma ligação, um mecanismo de arbitragem decide qual dos *flits* será conduzido de fato à ligação, ao passo que o outro será roteado para outra ligação que não é a mais otimizada, em termos de número de saltos, para a chegada ao seu destino.

Os mecanismos de controle de fluxos de tráfego das arquiteturas sem *buffers* são simplificados e locais. As arquiteturas clássicas de controle de fluxo necessitam de algum tipo de mecanismo de controle para evitar o sobrecarregamento da rede e evitar que os *buffers* se sobrecarreguem. Nas redes

sem *buffers* não há a necessidade destes mecanismos, já que um *switch* injeta um *flit* na rede quando, pelo menos, um canal está disponível. Isto pode ser verificado localmente sem qualquer necessidade de comunicação entre os *switches*.

Figura 8: Ilustração do processo de roteamento em um *switch* sem *buffers*: em um determinado ciclo, quatro pacotes chegam ao *switch* pelos canais de entrada e desejam acessar o canal de saída da face “N” para chegarem aos seus respectivos destinos. O mecanismo de arbitragem do *switch*, o qual varia de acordo com a arquitetura, decide que o pacote proveniente do canal de entrada da face “E” acessará o canal de saída da face “N” (ligação em destaque). Os outros três pacotes, por sua vez, serão defletidos para os canais de saída das outras faces, configurando as outras ligações ilustradas.

O mecanismo de roteamento nas NoCs sem *buffers* utiliza o conceito de deflexão. No caso de dois *flits* necessitarem acessar o mesmo canal de saída para chegar ao seus respectivos destinos, um deles acessará a porta desejada, contudo o outro será defletido para uma outra porta de saída. Dessa forma, nas redes sem *buffers*, o número de canais de entrada deve ser igual ao de saída, pois não há como armazenar os pacotes que queiram acessar a mesma porta de saída dentro do *switch*. A figura 8 ilustra este processo de roteamento.

Intuitivamente percebe-se que as redes sem *buffers* funcionam com melhor desempenho em cenários de baixo tráfego, pois um número maior de *flits* será direcionado às rotas mais produtivas a fim de chegar ao destino desejado. Em cenários de tráfego nos quais há *flits* sendo injetados por todas as portas de entrada, a latência de transmissão dos pacotes aumenta, o que

aumenta também a necessidade de registradores de entrada e saída nos *switches* receptores. Os *flits* que já chegaram no nó de destino devem esperar por aqueles que ainda estão navegando pela rede para que o pacote seja remontado. Por outro lado a eliminação dos *buffers* de roteamento compensa este aumento nos *buffers* de saída (MOSCIBRODA; MUTLU, 2009). As subseções a seguir apresentam as principais abordagens sem *buffers* para as redes em chip.

2.7.1 BLESS

A arquitetura BLESS (MOSCIBRODA; MUTLU, 2009) parte da abordagem da eliminação dos *buffers* da arquitetura de rede tradicional. Dessa forma, não há *buffers* de entrada e consequentemente não há como utilizar canais virtuais (seção 2.6). Os próprios canais físicos atuam como *buffers* para a NoC e, para que a abordagem sem *buffers* seja viável, é necessário que o número de canais de saída seja maior ou igual ao número de canais de entrada. Diferentemente da abordagem clássica na qual os pacotes ou *flits* que disputam um mesmo canal de saída são armazenados em *buffers*, a arquitetura BLESS admite um sistema de prioridades no uso dos canais. O pacote mais prioritário utiliza o canal enquanto os outros são redirecionados aos canais restantes de acordo com um mecanismo de prioridades. O critério de prioridade mais efetivo é o *oldest-first* no qual os pacotes ou *flits* são dotados de um mecanismo de tempo de vida baseado no *timestamp* de seus respectivos momentos de criação (MOSCIBRODA; MUTLU, 2009).

Há dois tipos de abordagens BLESS: a baseada em *flits* denominada de FLIT-BLESS e a baseada em pacotes, a qual utiliza a técnica de roteamento em *wormhole* (seção 2.6), denominada de WORM-BLESS.

Na abordagem FLIT-BLESS cada *flit* é roteado de maneira individual, o que facilita os mecanismos de controle dos *switches*. Por outro lado, a existência de vários *flits* têm impacto no tempo de transmissão, afetando a latência da NoC (seção 2.4). Além disso, cada *flit* necessita de um cabeçalho o que também afeta negativamente a latência e o consumo energético da rede. Finalmente maiores latências implicam em maiores requisitos de *buffers* de saída para a montagem dos pacotes a partir de seus respectivos *flits*. As regras de

priorização de portas para a abordagem FLIT-BLESS são especificadas na Tabela 2. Resumidamente, dado um conjunto de *flits* que chegam ao *switch*, os *flits* que possuem mais tempo imersos na rede serão alocados às portas desejadas (que permitem chegar de maneira eficiente ao destino - regra 1) ao passo que os *flits* mais novos serão defletidos (regra 2).

A abordagem WORM-BLESS foi concebida como a evolução da abordagem FLIT-BLESS a fim de transpor os desafios da abordagem FLIT-BLESS supracitados. Na WORM-BLESS, a princípio, somente o primeiro *flit* do pacote necessita de cabeçalho. Os outros *flits* seguirão o mesmo caminho do primeiro não se espalhando pela rede.

Os mecanismos de injeção de pacotes e de arbitragem na NoC devem ser levemente modificados para que se evitem que determinados fluxos de tráfego monopolizem os canais. Na abordagem WORM-BLESS é utilizado o mecanismo de truncagem de pacotes que pode ser explicado por meio do corte de um pacote em grupos menores. Para seu correto funcionamento é necessário agregar um mecanismo de alocação de portas de saída para cada pacote composto por uma pequena tabela no *switch*. Em cada divisão de pacotes é necessário agregar um cabeçalho para a segunda parte resultante da divisão.

A combinação do algoritmo de truncagem de pacotes com a priorização de portas a partir do *timestamp* é importante pois assegura que os *flits* mais velhos são sempre roteados para a porta desejada. Assim os *flits* mais antigos tornam-se prioritários e sempre estarão seguindo um caminho que se aproxima do caminho ótimo para chegar ao seu destino. Na Tabela 2, há as regras de priorização de portas para a abordagem WORM-BLESS. Nota-se que tais regras distinguem *flits* de cabeçalho de *flits* de dados. Para um determinado *flit* de cabeçalho, uma nova porta necessita ser alocada. A porta desejada e não alocada para nenhum outro grupo de *flits* é a mais prioritária (regra 1). No caso deste tipo de porta de saída não estar disponível, a próxima prioridade são as portas desejadas e que estão atualmente alocadas para um determinado grupo de pacotes (regra 2). Neste caso, a porta é realocada para o novo grupo de *flits*, sendo que o grupo para o qual a porta estava alocada será truncado. Assim um grupo de *flits* mais prioritário é capaz de truncar um grupo de pacotes já alocado. O primeiro *flit* do grupo de pacotes truncados torna-se um

novo *flit* de cabeçalho e será realocado para outra porta. Assim haverão dois grupos de *flits* os quais serão roteados de maneira independente ao destino. No caso de todas as portas já estarem ocupadas por *flits* de prioridades maiores, o *flit* de cabeçalho é alocado para uma porta de saída não desejada (ele é defletido - regras 3 e 4). Finalmente se o *flit* não é de cabeçalho, por definição sua porta de saída já está definida e alocada (regra 5).

Tabela 2: BLESS: políticas de priorização de pacotes

<i>flit</i> BLESS	<i>worm</i> BLESS
1 - atribuir <i>flit</i> para porta desejada 2 - atribuir <i>flit</i> para porta não desejada ← pacote a transmitir é defletido	if <i>flit</i> contém cabeçalho then 1 - atribuir <i>flit</i> para porta não alocada desejada 2 - atribuir <i>flit</i> para porta alocada desejada ← pacote em transmissão é truncado 3 - atribuir <i>flit</i> para porta não alocada e não desejada ← pacote a transmitir é defletido 4 - atribuir <i>flit</i> para porta alocada não desejada ← pacote em transmissão é truncado ← pacote a transmitir é defletido else 5 - atribuir o <i>flit</i> para a porta que está alocada ao seu respectivo pacote end if

Nota: O *switch* arbitra suas portas conforme a ordem de prioridades desta Tabela. Somente portas livres são consideradas, ou seja, portas que não foram assinaladas a *flits* de maior prioridade (maior tempo na rede) em um mesmo ciclo.

É importante ressaltar que o mecanismo de truncagem ocorre somente para pacotes com níveis de prioridade inferior a do pacote a ser injetado ou retransmitido. No caso de haver mais de uma porta disponível, os algoritmos priorizam a porta que está na mesma direção pela qual o *flit* adentrou no *switch*.

2.7.2 CHIPPER

CHIPPER (FALLIN; CRAIK; MUTLU, 2011) é uma abordagem evolucionária da arquitetura BLESS (seção 2.7.1) baseada em uma rede de permutações e em um algoritmo que emprega um pacote com status especial denominado de *golden*. Antes de entrar na rede, o pacote é dividido em *flits* e, por meio de uma rede de blocos de arbitragem que os processa em pares, é possível determinar uma sucessão de prioridades para um conjunto de *flits*. A Figura 9 ilustra a arquitetura a ser modelada.

Figura 9: Arquitetura CHIPPER.

Adaptado de (FALLIN; CRAIK; MUTLU, 2011)

A primeira parte consiste do mecanismo de injeção e ejeção de *flits*. Basicamente um *flit* é injetado em um *switch* CHIPPER quando há espaço livre em uma de suas quatro portas de saída. O espaço livre provém da ejeção de um outro *flit* que acabou de chegar ao seu *switch* de destino. Dessa forma, agrupando-se os *switches* em uma rede, percebe-se que não há *buffers* entre os mesmos para conter eventuais disputas por uma certa porta de saída. Quando dois *flits* competem pelo mesmo recurso, um deles necessariamente não conseguirá o acesso e será defletido para uma rota diferente da desejada. O mecanismo de direcionamento dos *flits* é feito pela rede de blocos de arbitragem. O conjunto de blocos é testado em pares decidindo-se um *flit* vencedor e um *flit* perdedor em cada turno.

O critério de decisão dos *flits* vencedores é dado por meio da atribuição de um status especial, denominado de *golden*, para um determinado pacote. Este status é atribuído a um pacote em um certo intervalo dentro da rede em chip. Quando um pacote possui o status *golden* todos os seus *flits* o possuirão

e serão prioritários nos momentos nos quais necessitarem competir por uma porta de saída com um outro *flit*. Este tipo de competição caracteriza a disputa de um *flit* com status *golden* e outro com status não *golden*. Por outro lado, há os casos nos quais há dois *flits* com status *golden* ou com status não *golden* que disputam uma mesma porta de saída. Em ambos os casos, o vencedor é decidido aleatoriamente. Nota-se que mesmo nos momentos nos quais os quatro *flits* venham a disputar uma mesma porta de saída, um deles obterá tal porta enquanto os outros serão desviados para rotas não desejadas de acordo com os resultados do módulo de arbitragem, o que possibilita o uso de uma arquitetura sem *buffers* de espera com o custo de aumentar o caminho crítico de um *flit* no sistema.

2.7.3 MinBD

A arquitetura MinBD: Minimally-Buffered Deflection Routing for Energy-Efficient Interconnect (FALLIN *et al.*, 2012) propõe uma abordagem aprimorada para as arquiteturas de redes em chip sem *buffers*. Partindo do pressuposto que as redes sem *buffers* baseadas em deflexão são ineficientes em NoCs com um grande número de *switches* e em cenários de tráfego mais intenso, é proposta a criação de uma rede de deflexão com um *buffer* lateral mínimo a fim de evitar a circulação desnecessária de *flits* nos canais da NoC, evitando-se o desperdício de recursos energéticos sem aumentar a complexidade ou área da NoC. A Figura 10 ilustra a arquitetura MinBD.

Figura 10: Arquitetura MinBD.

Fonte: Fallin *et al.* (2012)

A abordagem MinBD é baseada na arquitetura CHIPPER, contudo o me-

canismo de status *golden* dos pacotes é modificado de tal forma a possuir um segundo nível de prioridade. O segundo nível é utilizado nos casos nos quais não há um pacote *golden* no momento da arbitragem. Neste cenário utiliza-se da estratégia de que um pacote não será defletido nos dois estágios de arbitragem, o que garante o destino desejado a um dos pacotes, mesmo em caso de ausência de *flits* com prioridade *golden*. Tal mecanismo é denominado de *silver priority*.

Outra abordagem inovadora foi a existência de dois *buffers* de ejeção a fim de melhorar o fluxo de *flits* ejetados (que chegaram ao destino) do *switch*. A motivação para o uso desta quantia de *buffers* foi que em 8,5% dos casos nas simulações adotadas um *flit* poderia ser ejetado ao invés de ser defletido se não existisse somente um *buffer* de saída de *flits*.

2.8 Sinopse

Esta seção resume os aspectos principais discutidos neste capítulo.

A Tabela 3 resume as principais topologias discutidas.

Tabela 3: Topologias apresentadas - principais aspectos

Topologia de NoC	Principais Características
malha	estrutura regular, número de saltos significativo
<i>small-world</i>	número baixo de saltos, muitas entradas e saídas para cada <i>switch</i>
<i>butterfly</i>	número baixo de saltos, número elevado de conexões dentro da topologia
cúbica	número baixo de saltos, menor quantidade de conexões dentro da topologia

A Tabela 4 resume as principais características acerca das arquiteturas de *switch* discutidas.

Tabela 4: Arquiteturas apresentadas - principais aspectos

Arquitetura de NoC	Principais Características
clássica	emprega canais virtuais, facilidade de desenvolvimento
BLESS	ausência de <i>buffers</i>
CHIPPER	ausência de <i>buffers</i> , prioridade especial (<i>golden</i>)
minBD	presença de um <i>buffer</i> para ejeção temporária de <i>flits</i> e de um segundo nível de prioridade denominado (<i>silver</i>)

3 EMPREGO DE REDES SEM FIO EM NOCS

A abordagem das Redes em Chip sem Fio (WiNoC - *Wireless Network on Chip*) é uma evolução do conceito de NoC. Como são dotadas de mecanismos de roteamento simples associados às tecnologias sem fio, é possível conciliar fluxos de tráfego entre diferentes módulos por meio da redução de barramentos (WU; WANG; ZHAO, 2010) ou mesmo atuando em conjunto com redes em chip tradicionais na transmissão de informações (ZHAO; WU, 2012).

Há pesquisas sendo desenvolvidas com resultados promissores no campo de estudos relacionados ao acesso físico (O. *et al.*, 2005). Juntamente com as melhorias nas tecnologias de radiotransmissão, as WiNoCs emergem como indutores para melhoria de desempenho e escalabilidade em NoCs. As próximas seções enfatizam este aspecto por meio de uma visão geral das principais abordagens para radiotransmissão em chip que estão sendo investigadas (seção 3.1), como também alguns exemplos de abordagens envolvendo modelagem e simulação da dinâmica em rede (seção 3.2), e também aspectos envolvendo o uso de protocolos dinâmicos para a economia energia em redes em chip (seção 3.3). No fim deste capítulo, são enumerados os principais aspectos discutidos por meio de uma sinopse (seção 3.5).

3.1 Abordagens de transmissão sem fio

Esta seção tem como objetivo apresentar os principais campos de investigações para antenas em chip (O. *et al.*, 2005) as quais servem como base para uma implementação do canal sem fio em chip. Destacam-se o emprego da tecnologia *Ultra Wide Band* (seção 3.1.1), as abordagens das antenas em zigue-zague (seção 3.1.2), das antenas fractais (seção 3.1.3) e dos nanotubos de carbono (seção 3.1.4).

3.1.1 O emprego de *Ultra Wide Band*

O uso da tecnologia *Ultra Wide Band* (UWB) desponta como um dos campos de pesquisa para a transmissão usando canal sem fio (SAHA; SASAKI; KIKKAWA, 2006; WATANABE; KIMOTO; KIKKAWA, 2004). Segundo Zhao e Wu (2012), o emprego da tecnologia *Ultra Wide Band* usando modulação impulsiva de gaussianas é uma oportunidade para a comunicação a curtas distâncias com baixo consumo energético e com um diverso espectro de frequências. Além disso, o fato dos sinais serem transmitidos sem portadora simplifica as implementações dos circuitos de radiofrequência. Por conta dessas características tal abordagem é uma solução atrativa para a comunicação entre os núcleos em chip. Como os pulsos possuem curta duração, consegue-se alta transmissão de dados com taxa sinal ruído constante.

Há alguns estudos relacionados à síntese de circuitos que empregam *Ultra Wide Band* em transmissão de sinais. Razavi *et al.* (2005), por exemplo, desenvolveram um transceptor empregando a tecnologia UWB com característica multibanda (salto de frequências). Embora o trabalho não deixe claro qual foi a abordagem de antenas utilizada, são destacados alguns dos problemas relacionados ao uso da *Ultra Wide Band* em CMOS. O primeiro deles é associado ao tempo de resposta dos *phase locked loops* (PLLs) que demoram algumas centenas de ciclos para se estabilizar o que impede um alto dinamismo nos saltos em frequências. Além disso há dificuldades relacionadas à síntese de osciladores locais ágeis, os quais podem gerar interferências e distorções entre as harmônicas dos sinais. Finalmente também há desafios a serem superados em relação às discordâncias de fase e ganho associadas às quadraturas (defasagens de 90°) e aos conversores.

A arquitetura proposta por Razavi *et al.* (2005) é ilustrada na Figura 11-a. O processo de recepção consiste de um amplificador de baixo ruído (LNA) com três entradas para cada uma das três bandas tratadas. Cada entrada é direcionada para um *mixer* selecionável em quadratura. O sinal resultante é aplicado a um filtro de Sallen-Key (JUNG, 2005) de quarta ordem e a um passa-baixas de primeira ordem. Esta sucessão de filtros permite uma amostragem superior a 512MHz. O caminho de transmissão, por sua vez, também emprega um filtro de Sallen-Key, *mixers* e um estágio de saídas o qual compartilha a antena

Figura 11: Transceptor UWB.

(a) Diagrama de blocos

(b) Fotografia da disposição do circuito no silício em uma área ativa de aproximadamente 1mm x 1mm empregando-se tecnologia CMOS de 0.13µm

Fonte: Razavi *et al.* (2005)

com o amplificador de baixo ruído. As frequências dos osciladores locais (LO) são sintetizadas por meio de três PLLs independentes com o objetivo de evitar a mistura das harmônicas de cada uma das entradas. A Figura 11-b retrata disposição no silício deste circuito cuja potência dissipada total é de 105mW.

3.1.2 Antenas zigue-zague

A integração de antenas em um substrato semiconductor antecede as atividades na pesquisa recente por, pelo menos, dez anos. Algumas implementações menos recentes de antenas em substratos semicondutores utilizaram osciladores de diodo em seu projeto original (BUECHLER *et al.*, 1986). Nos anos 90 substratos de alta resistividade foram empregados para fabricar antenas operando entre 90 a 802 GHz (REBEIZ *et al.*, 1992). Com a evolução da tecnologia de microchips, atualmente é possível produzir tais antenas com um grau de compactação muito maior e a um menor custo. A Figura 12, por exemplo, exibe um dipolo de antenna zigue-zague sintetizada em um substrato de silício e sua seção transversal. Para aplicações operando a 24-GHz uma antenna típica ocupa $3\text{-}4\text{mm} \times 0.15\text{mm}$ (LIN *et al.*, 2007).

Figura 12: Antenas em chip fabricadas em um substrato de $20\text{-}\Omega\text{-cm}$ (a). Secção transversal (b).

Fonte: Lin *et al.* (2007)

Segundo Lin *et al.* (2007), a frequência 24GHz foi empregada com o objetivo de compactar a antenna e o circuito de transmissão utilizando tecnolo-

gia CMOS de 130nm. Para a avaliação dos resultados empregou-se o ganho como métrica conforme descrito na equação 3.1:

$$G_a = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) \quad (3.1)$$

O ganho do par de antenas é dado pelos ganhos de transmissão G_t e recepção G_r considerando perdas de propagação no meio. R é a separação entre as antenas e α é a constante de atenuação, a qual considera a perda por condução do substrato. G_a é obtido por meio dos parâmetros de espalhamento S para matriz de espalhamento de duas portas. O circuito de transmissão é tratado como uma caixa preta na qual os parâmetros de transmissão são as razões de ondas de tensão que entram e saem das portas. Um parâmetro de espalhamento S_{ij} é definido pela fração da onda de tensão entrando pela porta j e saindo pela porta i (WENTWORTH, 2008).

Verificou-se que desempenho das antenas de 24-GHz, por meio da análise de seu ganho, foi suficiente para satisfazer os requisitos de comunicação dos nós. Lin *et al.* (2007) também examinaram o desempenho de antenas operando a frequências mais baixas (5.8GHz) para distâncias de comunicação maiores.

A fim de determinar a viabilidade de se construir um circuito de transmissão de rádio em CMOS (130nm), foi sintetizado um amplificador de baixo ruído (LNA) juntamente com uma célula de Gilbert a qual foi associada à antena em chip conforme descrito na Figura 13.

Acoplado-se a antena de 3mm a um gerador de sinais (Agilent 8254A) Lin *et al.* (2007) conseguiram receber satisfatoriamente o sinal emitido. O aparato de recepção emprega o circuito da Figura 13 e está 5 metros de distância do aparato emissor. Nota-se que por meio deste experimento foi possível estabelecer comunicação incorporando uma antena em chip a uma distância de 5m usando um circuito rádio CMOS.

Sasaki *et al.* (2009), por sua vez, desenvolveram um receptor UWB usando a tecnologia CMOS 0.18 μm a qual emprega pulsos monocíclicos gaussianos (equação 3.2) para a transmissão associada a uma antena zigue-zague integrada ao silício. Tal receptor (Figura 14) foi capaz de recuperar 200 Mbps de

Figura 13: Circuito transmissor (20-GHz) fabricado em CMOS (130nm). Diagrama esquemático do amplificador de baixo ruído (LNA) e da célula de Gilbert (a). Layout do circuito em CMOS associado a uma antena em chip de 3mm (b).

Fonte: Lin *et al.* (2007)

dados a uma distância de 0.5mm transmitidos por uma antena integrada em outro chip. O PLL é responsável por metade da energia consumida (19mW), *buffers*, conversores RZ, NRZ e demodulador consomem 13mW e o *template generator* consome 6mW.

$$y(t) = \sqrt{\epsilon} \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{\tau} \right) e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{\tau} \right)^2} \quad (3.2)$$

Onde:

τ : inverso da frequência central f_c

ϵ : permissividade do meio

t : instante de tempo final

t_0 : instante de tempo inicial

Figura 14: Fotografia do chip de um receptor UWB com suas respectivas dimensões onde o *Phase Locked Loop* é responsável por sincronizar o sinal de *clock* de referência com o *clock* interno e o RZ *Return-Zero* e NRZ *Non-return-to-zero* são conversores de sinais binários.

Fonte: Sasaki *et al.* (2009)

3.1.3 Antenas fractais

Outra abordagem para a síntese de canal sem fio em chip desponta no emprego de antenas fractais. Este tipo de antena se destaca para o emprego em WiNoCs por conta de sua relativa facilidade de síntese em chip (O. *et al.*, 2005).

Os primeiros resultados experimentais acerca do uso das propriedades das estruturas em fractal aplicadas às antenas de tamanho reduzido foram feitos a partir da estrutura clássica da curva de Koch (ADDISON, 1997). Puente *et al.* (1998), por exemplo, demonstraram, por meio de resultados experimentais e de simulações, como um monopolo de Koch (BALIARDA; ROMEU; CARDAMA, 2000) pode melhorar as características relativas a radiação (ressonância, frequência e banda) em relação a um monopolo linear comum. Os experimentos consistiram na implementação das cinco primeiras iterações da curva de Koch juntamente com um monopolo clássico para comparação (Figura 15). A partir dos resultados experimentais e das simulações concluiu-se que, com o aumento da ordem da curva de Koch, a resistência de radiação aumenta e a reatância diminui, melhorando o desempenho geral da antena.

Figura 15: As cinco primeiras iterações (K1-K5) da curva de Koch em uma configuração de monopolo. K0 é um monopolo linear o qual foi utilizado como base para comparação nos experimentos e simulações.

Fonte: Puente *et al.* (1998)

Além das curvas de Koch, os fractais de Sierpinski também foram estudados. Kimoto *et al.* (2004) por exemplo, desenvolveram experimentos para aferir o desempenho da transmissão de dados utilizando antenas do tipo Tapete de Sierpinski (Figura 16-a) associado à comunicação UWB (seção 3.1.1). Utilizou-se dois dipolos do tipo Tapete de Sierpinski em três configurações de dimensões (1.0×1.9 , 2.0×3.8 e 4.0×7.6 mm²) sobre um substrato de silício

separados por uma distância variando entre 5.0 até 30.0 mm. Por meio de um acoplador híbrido de 180° geram-se sinais de diferenciais para os dipolos de antenas. No experimento o desempenho do UWB obteve perdas de retorno inferiores a 10dB, juntamente com a impedância de entrada cujos resultados apresentaram $ROTE < 2$ - Razão de Onda de Tensão Estacionária (WENTWORTH, 2008) - em todo o domínio de frequências utilizado (6-26.5GHz). Quanto menor a ROTE mais potência é transmitida para a antena, logo resultados demonstram que o desempenho das antenas foi satisfatório (KIMOTO *et al.*, 2004).

Figura 16: Configuração de um dipolo de Tapete de Sierpinski de $20\text{-}\Omega\text{-cm}$ (a). Dipolo em triângulo de Sierpinski (b)

Fontes: O. *et al.* (2005) e Na e Xiao-wei (2005)

As propriedades de alguns tipos de antenas fractais também permitem a operação multibanda (NA; XIAO-WEI, 2005). A vantagem da operação multibanda reside no fato de se conseguir diferentes níveis de acesso ao meio o que aumenta o número de nós da rede em chip envolvidos na comunicação sem fio. Por meio de simulações dos tipos Tapete e Triângulo de Sierpinski (Figura 16-b), Na e Xiao-wei (2005) demonstraram que não é a natureza fractal que necessariamente dá origem ao comportamento multibanda das antenas, mas sim sua forma. A geometria fractal deve interceptar o exterior das regiões no qual a corrente elétrica circula para que o comportamento multibanda seja averiguado. Dessa forma, as antenas do tipo Tapete não são multibanda ao passo que as antenas hexagonais e pentagonais possuem esta característica (NA; XIAO-WEI, 2005).

Kumar e Gaikwad (2013) estudaram a compatibilidade das antenas fractais com o emprego da tecnologia *Ultra Wide Band*. A antena empregada no estudo é o resultado da concatenação de grupos similares aos triângulos de

Figura 17: Visão no eixo vertical da antena fractal com quatro iterações sintetizada por Kumar e Gaikwad (2013)

Sierpinski (Figura 16-b) em diversos níveis. O primeiro nível é composto por doze arcos em cujos lados internos foram sintetizados triângulos isósceles. Nos níveis internos subsequentes são sintetizados instâncias cada vez menores até atingir o quarto nível resultando no padrão ilustrado na Figura 17. Por meio de simulações e da síntese da antena ilustrada na Figura 17 avaliaram-se os efeitos do número de iterações, das dimensões horizontais e verticais da base da antena. O aumento do número de iterações possibilita a melhoria do coeficiente de reflexão da antena da mesma maneira que os resultados obtidos por Baliarda, Romeu e Cardama (2000). A antena fractal mostrou-se apta para aplicações utilizando a tecnologia UWB em termos de frequências e padrões de radiação. Por serem compactas, relativamente simples de fabricar as antenas fractais despontam como potencial candidato para a síntese em chip visando seu uso em comunicações sem fio.

3.1.4 Nanotubos de carbono

Uma outra abordagem em estudo é a obtenção de antenas feitas a partir de nanotubos de carbono. Burke, Yu e Rutherglen (2005), por exemplo, afirmam que o uso de pacotes de nanotubos, por exemplo, permite a criação de circuitos apropriados para o casamento de impedâncias em sistemas de 50Ω . Além disso, ainda segundo Burke, Yu e Rutherglen (2005), os nanotubos possuem resistividade menor e condutividade maior quando comparados ao

cobre, o que demonstra o potencial da tecnologia.

Estudos teóricos acerca do desempenho dos nanotubos como antenas também foram desenvolvidos (HUANG; YIN; LIU, 2008). Por meio de predições baseadas em modelos de condutância, de impedância, de distribuição de corrente e de radiação de campo elétrico em pacotes circulares e retangulares de nanotubos (Figura 18), Huang, Yin e Liu (2008) concluem que o uso dos pacotes melhora o desempenho das antenas de nanotubos se comparadas ao uso individual dos mesmos. A eficiência de um pacote de nanotubos chega a ser de 30-40dB mais alta que a de um dipolo composto somente por um nanotubo.

Figura 18: Esquema de pacote circular (a) e retangular (b) de dipolo de nanotubos de carbono. Cada dipolo circular e retangular consiste em dois pacotes de nanotubos conforme ilustrado respectivamente em (b) e (d).

Fonte: Huang, Yin e Liu (2008)

Além das abordagens teóricas, outros estudos procuraram demonstrar que os nanotubos possuem propriedades relacionadas às das antenas existentes. Wang *et al.* (2004) demonstraram que os espalhamentos da luz em nanotubos alinhados mostram ser quantitativamente consistentes com os padrões de uma matriz de antenas. Dois efeitos básicos de antenas foram estudados:

1 - o efeito da polarização no qual não há resposta da antena quando o campo elétrico da radiação incidente é polarizado perpendicularmente ao dipolo do eixo da antena.

2 - o efeito do comprimento da antena cuja resposta é maximizada quando seu comprimento é múltiplo do comprimento de metade do comprimento de onda da radiação do meio.

Em outro estudo, Kempa *et al.* (2007) evidencia ainda mais os efeitos dos nanotubos alinhados como antenas quando submetidos a um feixe de laser, demonstrando que sua radiação está em acordo com a teoria de antenas de rádio e sua respectiva modelagem e simulação. O espalhamento do feixe é fundamentalmente em reflexão especular, estando de acordo com as análises teóricas realizadas. Além disso, também foram executadas simulações da resposta de uma antena de diâmetro desprezível em relação ao comprimento (similar a um nanotubo de carbono).

O experimento principal consiste em medir a resposta dos nanotubos a um feixe de laser por meio de um anteparo. Constatou-se que os resultados experimentais e os das simulações são essencialmente idênticos, incluindo intensidade e linhas de interferência. Confirmou-se também que este alinhamento entre a teoria e o experimento continua para outros ângulos de incidência, comprimentos de onda e dos nanotubos. A Figura 19 resume os resultados obtidos.

O trabalho de Koksai e Ekici (2012) explora outra modelagem teórica para um receptor de radiofrequências baseado em um arranjo de nanotubos denominado de floresta. Uma floresta de nanotubos é definida como um grupo de milhares de nanotubos alinhados verticalmente em um mesmo substrato. O modelo do receptor é experimentado em um cenário de baixa relação sinal-banda (a banda do sinal é muito menor que a banda aceita pelos nanotubos) e também em uma abordagem de alta relação sinal-banda (a banda do sinal é maior que a banda aceita pelos nanotubos) nas quais explora-se o fato da taxa de transmissão ser proporcional ao número de nanotubos com uma razão sinal ruído aceitável. Koksai e Ekici (2012) também mencionam aplicações para o regime de baixa relação sinal-banda as quais consistem em sistemas os quais ficam desativados por um longo período de tempo e só devem ser ativados ao receber o respectivo sinal de ativação. A taxa de transmissão é da ordem de poucos kilobits por segundos, o que evidencia ainda mais a aplicação deste regime para sinais de controle nos quais a taxa de erro de comunicação dever ser mínima. A motivação do regime de alta razão sinal-banda é demonstrar que o receptor de nanotubos de carbono pode operar com taxas de transmissão semelhantes aos receptores atuais (Mbps). Apesar do receptor ser feito com a associação de milhares de nanotubos, o grau de miniaturização é de-

Figura 19: Comparação entre os mapas de radiação experimentais (a, b) e os calculados (c, d) para dois comprimentos diferentes de nanotubos. Em (a) e (c) $l \approx 850\text{nm}$ e em (b) e (d) $l \approx 3.5\text{ }\mu\text{m}$. O comprimento de onda é $\lambda=543.5\text{nm}$ e o ângulo de incidência do laser $\theta=40^\circ$.

Adaptado de: Kempa *et al.* (2007)

fendido pelo fato das estruturas serem menores que antenas de comunicação sem-fio atuais.

Figura 20: Operação básica de um nanoreceptor

Fonte: Koksai e Ekici (2012)

O modelo físico de cada elemento da floresta de nanotubos é ilustrado na Figura 20. Ele consiste de um nanotubo de carbono acoplado a um ânodo, deixando sua outra extremidade livre para se movimentar. Tal abordagem explora as propriedades elásticas dos nanotubos para induzir o movimento da extremidade livre por meio de um campo elétrico longitudinal ao nanotubo. Por meio desta excitação eletromagnética, há o aumento da densidade de cargas na ponta do nanotubo a qual induz seu movimento. Propriedades fundamentais como a massa, o comprimento e o diâmetro do nanotubo determinam a frequência ressonante e o fator de qualidade desta vibração. A resposta da vibração tem seu pico quando a frequência incidente é igual a frequência ressonante e diminui à medida que a diferença entre estas duas frequências aumenta. O aumento do campo elétrico entre a ponta do nanotubo e o cátodo gerando as cargas saltem pelo espaço entre a ponta do nanotubo e o cátodo gerando uma corrente de tunelamento a qual está ilustrada na Figura 20. Esta corrente gera um campo elétrico cuja raiz quadrada varia em função da radiação inci-

dente no nanotubo (KOKSAL; EKICI, 2012), a qual é usada para decodificar os sinais recebidos.

Os experimentos para o regime de baixa relação sinal-banda concentram-se no desempenho do receptor ligado às probabilidades de erros de transmissão. Por exemplo, empregando uma floresta de mil nanotubos, a probabilidade de erro neste regime é da ordem de 10^{-5} . Além disso o número de nanotubos é bastante sensível a relação sinal-ruído: diminuindo 1dB desta relação, aumenta-se o número de nanotubos por um fator de 100 a fim de que o desempenho (taxa de transmissão e probabilidade de erro) seja mantido.

Para a avaliação do desempenho no regime de alta relação sinal-banda foi utilizada a taxa de bits errados (BER). O número de nanotubos é significativamente maior para que este regime tenha desempenho similar ao de baixa relação sinal-banda em termos de probabilidade de erros. Enquanto o número de nanotubos no regime de baixa relação sinal-banda é da ordem de milhares, este número cresce para a ordem de milhões no regime de alta relação sinal-banda. Isso é causado porque a maior parte da energia do sinal está fora da banda do nanotubo de carbono e acaba sendo filtrada. Esta perda da energia do sinal é compensada com o aumento do número de nanotubos de carbono. Contudo tal abordagem ainda é válida dado que, com o estado atual da tecnologia, é possível dispor 10^6 nanotubos em uma área de $0.1mm^2$ (KOKSAL; EKICI, 2012).

3.2 Trabalhos relacionados de transmissão sem fio aplicada a redes em chip

Além dos avanços já descritos neste capítulo relacionados à camada física, nesta seção são abordados alguns trabalhos relacionados à modelagem e simulação de redes em chip sem fio. Conforme mencionado no começo deste capítulo, a escalabilidade é fundamental para o sucesso de qualquer arquitetura baseada em redes. Diante do desafio de proporcionar escalabilidade para as redes em chip em cenários de tráfego mais intensos, as tecnologias de transmissão por canais sem fio surgem como uma alternativa viável para o incremento dos fluxos de tráfego imersos na NoC (DEB *et al.*, 2012).

O estudo de Wu, Wang e Zhao (2010), por exemplo, foca no uso da abordagem de redes em chip sem fio para reduzir a superfície ocupada por cada IP. Para tal, propõem uma arquitetura sem fio pura para transmissão de pacotes em substituição à tradicional arquitetura em malha (seção 2.5) em redes em chip irregulares nas quais cada IP ocupa uma área diferente em hardware. A análise de desempenho é feita por meio da comparação da arquitetura proposta com o roteamento padrão de caminho mais curto orientado a tabelas, e o trabalho de Schafer *et al.* (2005) que propõe um algoritmo de roteamento para redes em chip irregulares. Os experimentos são executados em uma plataforma de simulação própria focando em aspectos como o *throughput*, o atraso médio e o grau de irregularidade da topologia. Os resultados mostraram que o roteamento sem fio é 35% mais rápido e é 28.5% menos dispendioso em área de tabelas quando comparado com o roteamento tradicional, contudo o trabalho não deixa claro detalhes a respeito de como os fluxos de tráfego são gerenciados.

Outro trabalho pioneiro na análise do uso de redes em chip sem fio é o de Yoon e Park (2005) no qual há a proposta de uma topologia de rede em chip sem fio octogonal. Primeiramente há a modelagem da comunicação de WiNoCs por meio de equações, as quais focam no *throughput* e latência para, em seguida, haver a justificativa de tal modelo por meio de um simulador próprio implementado em C++. Apesar da simplicidade da topologia proposta, há um estudo de caso que aplica o IEEE 802.11a com o objetivo de analisar o tamanho mínimo dos *buffers* do *switch* para que seja possível uma operação confiável sem perda de pacotes.

Apesar de alguns dos campos de pesquisas de transmissão sem fio abordarem capacidades multibanda (RAZAVI *et al.*, 2005; NA; XIAO-WEI, 2005; GANGULY *et al.*, 2011a) as quais permitem que mais de um fluxo de tráfego seja transmitido sem haver colisões no acesso ao meio, é necessária a concepção de mecanismos de controle de acesso a fim de envolver um número maior de nós em topologias de WiNoCs. A partir da tecnologia UWB para distâncias curtas abordada na seção 3.1.1, por exemplo, consegue-se a transmissão simultânea dos canais sem fio, assegurando que os fluxos de tráfego no canal sem fio estejam a uma distância que leve em consideração a taxa de bits errados (BER *Bit Error Rate*) de tal forma que não interfiram uns

com os outros. Isso é feito por meio de um mecanismo de arbitragem baseado em permissões de acesso ao canal sem fio associado às posições geográficas dos emissores, receptores e vizinhos (ZHAO *et al.*, 2011). Há também a possibilidade de modelar protocolos de acesso ao meio para evitar colisões durante a transmissão dos canais sem fio. Por meio de uma máquina de estados associada a mecanismos de sincronização (ZHAO; WANG, 2008), é possível identificar os nós sem fio vizinhos e estabelecer diversos fluxos de tráfego sem colisões. O processo de acesso ao meio é dividido em duas fases principais: a da competição e a de transmissão de dados. A fase de competição inicia-se com um período de inicialização da máquina de estados e dos registradores do fluxo de dados. Em seguida vem o período de contenção de canal no qual se decide quais nós serão envolvidos na transmissão em uma determinada zona da rede. Finalmente a fase da competição termina com a autorização para um par de nós utilizar o canal sem fio para transmitir *flits* durante determinado período de tempo.

Associada a mecanismos de acesso ao meio, a tecnologia sem fio nas redes em chip proporciona o surgimento de uma nova abordagem de transmissão a qual propõe diminuir o número de saltos nas transmissões de informações intra-chip da mesma maneira que a a topologia *flattened butterfly* (KIM; BALFOUR; DALLY, 2007), descrita na seção 2.5.3, propõe. Os primeiros estudos provêm de simulações e análises de topologias dotadas somente de canais com fio. Ogras e Marculescu (2006), por exemplo, propõem o uso de canais de longa distância com fio, que conectam nós não adjacentes, usando o roteamento em *wormhole* (NI; MCKINLEY, 1993) para NoCs. Os experimentos são baseados em comparar uma malha tradicional com a abordagem de transmissão com links de longa distância em diversos cenários de tráfego sintético. Os resultados mostraram ganhos significativos em termos de latência e *throughput* da rede, contudo em alguns experimentos os links de longa distância tornaram-se um gargalo na rede por conta do acesso exagerado aos mesmos. O artigo ainda sugere estudos acerca do desenvolvimento de um protocolo de roteamento dinâmico o qual poderia melhorar o impacto dos links de longo alcance tomando a totalidade da rede como referência para a análise do desempenho.

Com a finalidade de otimizar a dinâmica de transmissão dos pacotes, as

redes sem fio em NoCs funcionam como uma nova camada na qual os *flits* com destinações mais longínquas são transmitidos entre grupos de *switches* dentro da rede em chip, diminuindo distâncias e a probabilidade de interferência entre os fluxos de tráfego de maior ordem com os de menor ordem (SHI; BURNS, 2008). No momento da transmissão de um *flit* por parte de um *switch*, um mecanismo de arbitragem hierárquica deve decidir por qual canal de transmissão (intra chip ou sem fio) o transporte será efetuado. Diante de tal contexto, mecanismos de zoneamento (ZHAO; WU, 2012) demonstram-se como uma boa alternativa para a transmissão de dados na NoC. A topologia hierárquica de Zhao e Wu (2012) é composta por nós separados em zonas com o objetivo de melhorar a capacidade de comunicação em chip. Por meio desta abordagem foi possível reduzir o atraso fim-a-fim em 33% em comparação com a tradicional topologia em malha ao passo que o *throughput* foi melhorado em 51%. As zonas podem ser regulares ou definidas com base nos fluxos de tráfego previamente estimados. De maneira similar, a densidade e a localização dos canais sem fio também pode ser uma função dos fluxos de tráfego na rede (ZHAO *et al.*, 2011).

Há também estudos que focam na dinâmica dos fluxos de tráfego usando redes em chip sem fio. Ganguly *et al.* (2011a) analisa o comportamento de redes em chip mistas com canais sem fio baseados na topologia *small-world* (seção 2.5.2). As métricas utilizadas foram latência, *throughput* e dissipação de energia. O *throughput* na saturação é quase quatro vezes maior em topologias dotadas de canais sem fio se comparadas com topologias compostas somente de canais com fio. O artigo também sugere que um novo mecanismo de controle de fluxos deve ser usado com o objetivo de melhorar o desempenho das redes em chip sem fio. Além disso, a análise de Ganguly *et al.* (2011b) evidencia os benefícios das WiNoCs, focando em um contexto de elevado número de falhas, característico do emprego de novas tecnologias como as da seção 3.1. O trabalho explora os resultados de estudos teóricos os quais afirmam que as redes em topologia *small-world* são resilientes a problemas de interconexão (ALBERT; JEONG; BARABÁSI, 2000) para propor uma arquitetura de WiNoC tolerante a falhas. Nesta arquitetura há a presença de atalhos nos quais a tecnologia de transmissão sem fio é empregada para aqueles de maiores distâncias ao passo que os atalhos de menor distância são de

fios tradicionais. Tal análise é baseada em sistemas de até 256 nós com protocolo de roteamento em *wormhole* baseado na busca exaustiva do menor caminho. Os resultados mostraram que as abordagens hierárquicas possuem desempenho superior à malha tradicional e que o *throughput* da rede não se altera de maneira considerável mesmo quando 75% dos nós são aleatoriamente desativados. Dessa forma, inovações na arquitetura podem contribuir para a robustez e eficiência energética mesmo quando projetadas com novos paradigmas, como o das WiNoCs, e diante de um alto grau de falhas.

Finalmente Chang *et al.* (2012) fazem uma análise mais detalhada da dinâmica de comunicação das WiNoCs comparando topologias organizadas hierarquicamente por meio de um simulador de NoCs próprio no qual o ganho da antena sem fio, dados de atraso e de banda são alimentados a partir de ferramentas externas. O trabalho concentra-se em uma rede com dois níveis hierárquicos. O primeiro nível utiliza somente canais com fio e é composto por *clusters*, de diferentes topologias, os quais são ligados a uma topologia em anel (segundo nível) por meio de um nó coordenador central em cada *cluster*. O segundo nível, em anel, possui atalhos sem fio correspondendo a uma topologia *small-world* conforme o arranjo descrito pela Figura 3-d. O roteamento é estático baseado em um mecanismo de *token-flow* no qual um nó é roteado pelo canal sem fio somente quando este possui o *token*. Utiliza-se uma política de *broadcast* no qual o nó emissor envia o sinal para todos os outros nós de forma que o nó de destino trata os *flits* enviados. O trabalho avalia a topologia no nível de dinâmica de rede e identifica que há um número ótimo de ligações sem fio para cada configuração de topologia o qual concilia consumo energético com o desempenho do *throughput*. Para topologias de 128, 256 e 512 nós, o valor ótimo de *throughput* é atingido com respectivamente 4, 6 e 10 canais sem fio. Isso acontece por conta da abordagem estática de roteamento na qual a latência para conseguir acesso ao canal sem fio aumenta significativamente com o número de canais sem fio. Além disso, quanto maior o número de canais sem fio, mais energia é consumida durante o processo de transmissão baseado em *broadcast*.

3.3 Uso de protocolos de roteamento dinâmico para a economia de energia

As investigações no meio físico têm como principal objetivo prover capacidades sem fio para qualquer nó em uma NoC. Por outro lado, a transmissão via rádio é ainda custosa em termos energéticos, o que incentiva os pesquisadores a focar também na complexidade do *switch* da rede em chip (seções 2.6 e 2.7) e na dinâmica da rede. Topologia (seção 2.5), capacidade de roteamento (dinâmico ou fixo), localização e quantidade de nós sem fio dentro de uma NoC tradicional (seção 3.2) são alguns dos parâmetros que os projetistas necessitam tratar a fim de minimizar os custos (seção 2.3) mantendo um desempenho aceitável.

A proposta deste trabalho contribui com os estudos de modelagem e simulação da seção 3.2 por meio da análise das WiNoCs com o objetivo de descobrir *trade-offs* estratégicos e novas abordagens para os *switches*. O foco do trabalho é em roteamento dinâmico, *broadcasting* e técnicas para simulação em multi-rotas. Um cenário atrativo para WiNoCs usando roteamento dinâmico é a possibilidade de se desligar seletivamente porções do chip sem a necessidade de interromper a comunicação, o que não é possível nas análises atuais uma vez que adota-se o roteamento estático (ZHAO; WU, 2012; YOON; PARK, 2005).

Em cenários de roteamento dinâmico, o uso de protocolos ad hoc sem fio clássicos como o DSR (JOHNSON; MALTZ, 1996), o AODV (PERKINS; ROYER, 1999) ou o DSDV (PERKINS; BHAGWAT, 1994), detalhados na seção 3.4), embora nunca testados em WiNoCs, pode ser efetivo dado suas similaridades com os requisitos de WiNoC em termos de auto-organização dos nós e aspectos de controle de fluxos. Neste trabalho há uma análise do usos dos três protocolos para redes sem fio supracitados em um ambiente de aplicação em WiNoCs na seção 5.2 além da visão geral da modelagem de consumo energético usando a ferramenta de simulação Orion (WANG *et al.*, 2002).

3.4 Protocolos ad hoc de roteamento sem fio

Esta seção descreve os aspectos principais dos protocolos envolvidos neste trabalho, a saber: DSDV (PERKINS; BHAGWAT, 1994), DSR (JOHNSON; MALTZ, 1996) e AODV (PERKINS; ROYER, 1999).

DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*) é um protocolo de roteamento proativo no qual cada estação de roteamento transmite mensagens periodicamente a fim de preencher tabelas com os nós de destinos e seus respectivos números de saltos. Cada nó difunde sua tabela de roteamento para os vizinhos de tal forma que seja possível para um nó localizar os outros na rede. Cada tabela de roteamento lista todas as destinações conhecidas e o número de saltos para cada uma, assim como o próximo salto. Além da transferência periódica de informações há também troca de mensagens durante qualquer evento no qual a rede modifica-se de maneira significativa. A fim de diminuir o *overhead* destas mensagens de controle, o protocolo somente transmite as informações alteradas por conta do evento que ocorreu na rede. As rotas são escolhidas adotando o critério do caminho mais curto usando o algoritmo de Bellman-Ford (MEDHI; RAMASAMY, 2007). O protocolo controla o processo de atualização das rotas por meio da adoção de números sequenciais em cada uma das mensagens.

DSR (*Dynamic Source Routing*) é um protocolo de roteamento reativo composto por dois mecanismos: descoberta de rotas e manutenção de rota. A descoberta de rota é descrita pela fase na qual o nó de origem recebe uma rota para o nó de destino, ao passo que o mecanismo de manutenção de rotas é usado para verificar a integridade da rota entre os nós de origem e destino. Os dois mecanismos operam segundo a demanda de tráfego, portanto, não necessitam de pacotes periódicos de nenhum tipo na rede. A descoberta de rota é baseada em duas mensagens: *route request* (RREQ) e *route reply* (RREP). As mensagens RREQ são enviadas pela fonte a qual demanda de seus nós vizinhos a localização de um destino. Os nós vizinhos adicionam seus endereços às mensagens e as retransmitem aos seus nós adjacentes até o momento no qual o destino é encontrado. As mensagens RREP retornam a sequência de endereços de nós para o emissor a qual será utilizada para roteamento. A manutenção de rota é baseada nas mensagens *route error*

(RERR). As mensagens RERR são enviadas, por exemplo, quando o número máximo de retransmissões de um pacote por parte de um nó é atingido. Esta mensagem de erro contém os endereços do nó que detectou o erro, o destino para o qual o pacote estaria sendo enviado. Ao receber a RERR mensagem um nó deve excluir de seu cache a rota na qual se processou o erro. Este protocolo é mais simples que o DSDV já que não necessita de tabelas de roteamento, sendo suficiente um cache das rotas em uso em cada nó emissor. Por outro lado, apresenta um tempo maior de resposta já que as rotas são elaboradas sob demanda por conta do DSR ser um protocolo reativo.

AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing*) é um protocolo de roteamento reativo baseado tanto no DSR e no DSDV. Este protocolo emprega um mecanismo de descoberta de rotas baseado no DSR, como também se beneficia das vantagens do estabelecimento de tabelas de rotas em nós intermediários. A diferença é mais visível em topologias maiores devido ao *overhead* gerado por se transportar informações de rotas em cada pacote. Há quatro tipos diferentes de mensagens: RREQ, RREP, RERR, HELLO. As três primeiras mensagens têm função similar às do DSR. As mensagens HELLO tem como objetivo verificar a comunicação dos links entre os nós vizinhos e também averiguar a entrada e saída de novos nós móveis na rede. Entre os parâmetros de destaque presentes nas tabelas de roteamento do protocolo AODV há o ID do destino, o número sequencial, o número de saltos para atingir o destino, o próximo salto e a lista de nós anteriores. As tabelas de roteamento do protocolo AODV permitem que os pacotes não necessitem manter a rota a ser traçada em seus cabeçalhos. Este protocolo difere do DSR porque cada nó possui uma tabela de roteamento diminuindo o *overhead* dos cabeçalhos dos pacotes. Apesar de possuir tabelas de roteamento, elas são menos complexas que as empregadas no DSDV.

3.5 Sinopse

Esta seção resume os aspectos principais discutidos neste capítulo.

A Tabela 5 sintetiza o estado da arte das principais vertentes de investigação de antenas em chip.

Tabela 5: Antenas em chip - estado da arte

Tecnologia	Estado da Arte
antenas zigue-zague	síntese de circuitos de recepção distâncias longas (m) (LIN; WU; O, 2005; LIN <i>et al.</i> , 2007) e curtas (mm) (SASAKI <i>et al.</i> , 2009)
antenas fractais	aferição, modelagem e comprovação de propriedades em aplicações para comunicação (NA; XIAO-WEI, 2005; KUMAR; GAIKWAD, 2013)
nanotubos de carbono	aferição, modelagem e comprovação de propriedades em aplicações para comunicação. Modelagem preliminar de receptores (KEMPA <i>et al.</i> , 2007; KOKSAL; EKICI, 2012)

A tabela 6 sintetiza os principais trabalhos relacionados com modelagem e simulação de WiNoCs. Destacam-se os estudos focados em redes hierárquicas, que podem ser simuladas utilizando a ferramenta de simulação descrita no capítulo 4.

Tabela 6: Modelagem e simulação de WiNoCs - trabalhos relacionados

Foco da Pesquisa	Descrição do Estudo
redes hierárquicas	topologias com zoneamento fixo (ZHAO; WU, 2012), dinâmica de rede baseada em topologias em <i>small-world</i> (GANGULY <i>et al.</i> , 2011a)
acesso ao meio	maquinas de estado para priorização de nós (ZHAO; WANG, 2008), abordagens focadas na transmissão entre nós adjacentes (ZHAO <i>et al.</i> , 2011)
simuladores	modelagem de WiNoC octogonal seguida de simulação (YOON; PARK, 2005), modelagem de WiNoCs usando diferentes topologias em um conjunto integrado de ferramentas de simulação (CHANG <i>et al.</i> , 2012)

Finalmente a tabela 7 resume os protocolos ad hoc sem fio de roteamento dinâmico utilizados na plataforma de simulação descrita no capítulo 4.

Tabela 7: Protocolos ad hoc sem fio - principais aspectos

Protocolo	Descrição
DSDV	rotas são elaboradas com base na transferência periódica das distâncias em número de saltos entre os nós
DSR	rotas feitas sob demanda. Baseado em duas mensagens: RREQ (<i>Route Request</i>) e RREP (<i>Route Reply</i>)
AODV	mescla dos conceitos usados no DSDV e DSR: as rotas são elaboradas sob demanda, contudo cada nó mantém uma tabela de roteamento menos elaborada, se comparada às do DSDV

4 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Com a finalidade de verificar o desempenho e o funcionamento de uma rede em chip sem fio é necessário o desenvolvimento de uma abordagem que permita averiguar estas redes. Apesar dos avanços tecnológicos da seção 3.1, descrever a arquitetura da WiNoC em hardware é ainda uma tarefa custosa. Portanto o emprego de metodologias recentes do projeto em hardware (ERBAS, 2006) permite facilitar esta tarefa e é uma alternativa para conseguir resultados preliminares, em um espaço de tempo menor, sem precisar descrever todo o chip. Para isto primeiramente modela-se arquitetura e as aplicações das IPs, a fim de averiguar quais são os *tradeoffs* existentes e se a abordagem proposta possui desempenho satisfatório em termos arquiteturais e de sistema. A partir dos resultados anteriores, é possível refinar a arquitetura. Finalmente, partindo de um modelo refinado com desempenho satisfatório, inicia-se o desenvolvimento do chip.

Apesar de nos capítulos anteriores o conceito de *flit* ser muito mencionado, na ferramenta de simulação desenvolvida, o termo pacote será utilizado para determinar as menores unidades de dados transmitidas entres os *switches*. A plataforma de simulação proposta neste trabalho (FERREIRA; MARGI, 2013) possui três componentes principais: o simulador ns-2, a descrição em baixo nível para a simulação do *switch* e os subsistemas de integração.

O ns-2 (ISI, 2011b) é um simulador de eventos discretos com o objetivo de estudar a dinâmica do tráfego em rede. O simulador possui suporte para simulações TCP, algoritmos de roteamento e para protocolos (*unicast* e *multicast*) de topologias com fio e sem fio. O ns-2 começou como uma variante do simulador de rede REAL em 1989 (KESHAV, 1997) e evoluiu com o passar dos anos. Em 1995, o desenvolvimento do ns-2 foi apoiado pela *Defense Advanced Research Projects Agency*, através do projeto VINT (USC, 1997),

Xerox PARC, Universidade da Califórnia Berkeley (UCB) e pelo Instituto de Ciências da Informação da Universidade do Sul da Califórnia (USC). Além disso, há contribuições substanciais de outros pesquisadores, incluindo o código sem fio dos projetos Daedalus da UCB e Monarch (RICE, 2004), e da Sun Microsystems.

Apesar da viabilidade na simulação de NoCs clássicas com fio no ns-2 (MANOHAR *et al.*, 2001) e do simulador possuir uma interface de simulação entre redes com fio e redes sem fio (ISI, 2011a), ela é limitada a simulações entre um domínio com fio e um domínio sem fio. Portanto não é possível a simulação de tráfego entre dois domínios (*clusters*) com fio intermediados por um domínio sem fio. Alterar o simulador ns-2 não faz parte do escopo deste trabalho e implica em desviar-se dos *releases* originais, o que desencoraja novas propostas. Diante dessas premissas, concebeu-se uma nova estratégia por meio do uso do ns-2 padrão para projetar uma arquitetura de simulador especificada neste capítulo.

Figura 21: Máquina de estados da plataforma de simulação. Todas as etapas descritas são feitas de forma automática baseado em parâmetros iniciais de simulação.

A idéia geral é aproximar-se ao máximo do paradigma emergente das Wi-NoCs, aproveitando-se das interfaces e conceitos existentes no ns-2. Dessa forma, propõe-se um ambiente de co-simulação no qual há a execução de uma simulação com fio principal e simulações sem fio amostradas equivalentes a simulação com fio principal. Por meio deste ambiente misto de simulação é possível conseguir um maior nível de detalhe do comportamento das redes

em chip sem fio no nível físico, abordando aspectos como o alcance do canal sem fio, do acesso ao meio, o que possibilita o uso de abordagens de acesso ao meio como a IEEE 802.11 trabalhada preliminarmente por Yoon e Park (2005), e do roteamento de protocolos dinâmicos buscando-se o desligamento parcial de nós da rede para a economia de energia, conforme abordado na seção 3.3.

Além disso, as abordagens sem fio permitem também analisar o tempo de resposta e a própria dinâmica interna dos protocolos de roteamento, as quais não seriam possíveis de simular utilizando somente a simulação com fio. Dessa forma, propõe-se uma abordagem iterativa, ilustrada na Figura 21, baseada em uma simulação única com fio em um intervalo de tempo T auxiliada por diversas simulações sem fio amostradas em intervalos $t < T$. Os canais da simulação com fio que possuem o papel de transmissores sem fio são alterados a fim de transmitirem os mesmos fluxos de dados e a mesma quantia de pacotes nos intervalos de tempo t . Em suma os canais com fio responsáveis pela transmissão de dados entre os *clusters* são modelados a partir dos resultados das simulações da malha sem fio. A equivalência entre as duas simulações é garantida por um módulo de convergência.

Para o desenvolvimento desta abordagem foi escolhida a linguagem de programação Java pelo fato da mesma apresentar um amplo espectro de opções e recursos de integração úteis para o desenvolvimento deste tipo de aplicação. No apêndice A há um exemplo de um script de simulação com fio gerado pela plataforma de simulação. No apêndice B há um exemplo de um script, o qual retrata a primeira simulação sem fio amostrada a partir dos resultados da simulação com fio anterior. Estes scripts são executados pelo ns-2 e seus arquivos de saída são lidos e analisados pela plataforma de simulação a fim de obter os dados necessários para a tomada de decisão realizada pelo módulo de convergência detalhado na seção 4.1.4.

A Figura 22 descreve a topologia simulada. Há dois tipos de *switches*: os dotados de canal sem fio e os que não o possuem. Os *switches* dotados de canais sem fio possuem arquitetura muito similar a minBD (seção 2.7.3), porém, ao invés de redirecionar os pacotes de volta ao mesmo *switch*, usa-se o canal sem fio como atalho para os pacotes que necessitam atravessar distâncias maiores que o tamanho de uma aresta de um *cluster* (em número de

saltos). A topologia é uma estrutura hierárquica composta por *clusters* sendo que em cada *cluster* há um nó central que possui acesso sem fio destinado aos pacotes que necessitem alcançar os outros *clusters* da rede. Os *switches* sem fio são dispostos de tal forma a constituírem somente as conexões descritas na figura 22. Por meio de tal estrutura é possível reduzir o número de saltos necessários para se chegar a um destino por pacotes que necessitem viajar grandes distâncias, o que aumenta o desempenho geral da rede.

Figura 22: Diagrama da topologia simulada. A rede é dividida em unidades menores denominadas *clusters*. As conexões pontilhadas e *switches* em preto estão presentes na simulação com fio pura e nas simulações sem fio. As conexões restantes são consideradas somente na simulação com fio.

Adaptado de: Ferreira e Margi (2013)

Na plataforma de simulação, a decisão acerca do acesso aos canais sem fio é baseada no número de saltos. Dado um fluxo de tráfego, se o canal sem fio apresentar uma alternativa com menos saltos que o roteamento tradicional pela rede com fio e, se houver a possibilidade de adicionar mais um fluxo de tráfego, o canal sem fio é utilizado. No caso de não ser possível a alocação no canal sem fio, o fluxo é administrado por meio do roteamento tradicional. A seção 4.1.4 apresenta maiores detalhes acerca de como os fluxos de tráfego são gerenciados na plataforma de simulação. Além das alternativas apresentadas como suporte para a decisão de utilizar ou não o canal sem fio apresentadas

nesta seção, há também a proposta de uma outra abordagem na seção 5.2 na qual se discute detalhadamente acerca do uso dos protocolos da seção 3.4 aplicados às WiNoCs.

4.1 Modelagem

Esta seção engloba os aspectos envolvidos na modelagem de uma Wi-NoC usando o ns-2 como base de simulação. Inicialmente descreve-se o funcionamento geral da simulação, seguido de aspectos importantes a respeito da convergência entre a simulação com fio e as simulações sem fio do ns-2, e finaliza-se com a especificação dos parâmetros e métricas envolvidas na simulação.

4.1.1 Fluxo principal da plataforma de simulação

O fluxo principal de simulação consiste primeiramente na simulação da arquitetura dos *switches* da NoC a fim de obter os dados temporais de execução médios dos *switches* com canal sem fio e dos que não o possuem. Estes valores obtidos podem ser integrados ao ns-2 por meio do parâmetro *link delay* disponível no simulador. A fim de efetuar este maior nível de detalhamento da arquitetura do *switch* a ferramenta Gem5 (BINKERT *et al.*, 2011) pode ser utilizada, conforme será analisado na seção 4.2. No diagrama de fluxo de dados da Figura 23 este processo é ilustrado pelo bloco 1.

Os parâmetros temporais relacionados à arquitetura do *switch* (bloco 2 da Figura 23) são agregados aos parâmetros de simulação (seção 4.1.2) por meio de um arquivo XML de entrada (respectivamente blocos 3 e 4 da Figura 23). A partir deste conjunto de parâmetros, elabora-se um *script* tcl (*Tool Command Language*) para a simulação da topologia da Figura 22 composta apenas por conexões com fio em um intervalo de tempo T no ns-2 (bloco 5). Após o término da simulação com fio executada no ns-2 (bloco 6), o arquivo de saída é analisado e amostrado (bloco 7) em intervalos de tempo $t < T$ gerando T/t *scripts* de simulação da malha sem fio simulando os nós em negrito na Figura 22 (bloco 8).

Figura 23: Fluxo principal de simulação.

Após a execução do conjunto de *scripts* das simulações sem fio (bloco 9), os resultados de cada simulação da malha sem fio são analisados, conforme as abordagens de convergência da seção 4.1.4, e comparados com os resultados da simulação com fio (respectivamente blocos 10, 11 e 12). Se o grau de similaridade for satisfatório com os valores mínimos ajustados na entrada (seção 4.1.2) o algoritmo de convergência (seção 4.1.4) termina e a simulação está concluída (bloco 13). Caso contrário, calculam-se novos parâmetros de simulação, repetindo-se o processo a fim de buscar métricas convergentes entre a simulação com fio e as simulações sem fio (bloco 14 da Figura 23). A figura 24 ilustra um exemplo de configuração de topologia gerado pelos scripts das simulações com fio e sem fio.

Figura 24: Exemplo de topologia com fio e sua topologia sem fio equivalente. Trata-se de uma configuração de fluxos de tráfego detectada em um intervalo de amostragem t na simulação com fio (a) a qual será reproduzida em uma simulação sem fio em (b). Os nós na cor preta são os emissores e receptores envolvidos na comunicação durante este intervalo de tempo t .

4.1.2 Parâmetros

Os parâmetros utilizados na plataforma de simulação (seção 4.1.2) foram dimensionados de tal forma a simular aspectos dos cenários de tráfego na NoC. O *throughput* das IPs é modelado por meio da aplicação CBR (*Constant Bit Rate*) disponível no simulador ns-2. É importante ressaltar que outros parâmetros como a modelagem das antenas e os parâmetros relativos ao acesso ao meio também podem ser modificados. Tais mudanças podem ser configuradas pelo usuário nas classes de geração dos scripts TCL do ns-2. Os parâmetros do arquivo XML de entrada do simulador incluem:

- número de *switches* por *clusters*;
- número de *clusters*;
- tamanho do pacote;
- intervalo de amostragem t para a simulação sem fio;
- *throughput* da aplicação;
- largura da banda da simulação com fio;
- atraso para a camada de enlace;

- tamanho da fila para a simulação com fio;
- tamanho da fila do *switch* da simulação sem fio;
- erro relativo máximo para a taxa de entrega e para o atraso médio;
- tempo de simulação T ;
- coeficiente de tráfego interno (tráfego dentro de um *cluster*);
- coeficiente de tráfego externo (tráfego entre *clusters*);
- número de saltos predominante para o tráfego interno;
- número de saltos predominante para o tráfego externo;
- abordagem de convergência.

É importante ressaltar que, por meio dos parâmetros que especificam o número desejável de saltos, é possível simular diferentes perfis de tráfego com origens e destinos mais próximos ou mais distantes. Tais fluxos de tráfego são escolhidos aleatoriamente no início da simulação. O uso da palavra predominante justifica-se pelo fato que, dependendo do tamanho da topologia e da quantia de fluxos de tráfego, não há como garantir que todos os fluxos tenham exatamente o número de saltos passado como parâmetro. O simulador, no caso de não encontrar alternativas de fluxos de tráfego de acordo com o passado como parâmetro, decrementa no número de saltos até que as porcentagens de tráfego interno e externos sejam satisfeitas.

O conceito de tráfego interno é definido como o número de nós fontes e destinos os quais são empregados no tráfego de pacotes dentro de um *cluster*. O tráfego externo é definido como o número de nós fontes e destinos os quais são empregados entre *clusters*. A figura 25 ilustra os dois conceitos.

Para a modelagem do canal sem fio foi utilizada o padrão IEEE 802.11 (IEEE, 1997), que inclusive possui um estudo de caso de seu emprego no contexto de WiNoCs (YOON; PARK, 2005). Dessa forma, a taxa máxima de transferência do canal sem fio é de 54Mbps. A posição dos nós sem fio é ajustada de acordo com os padrões de comunicação desejados. Nos experimentos da seção 5.1, por exemplo, a topologia é ajustada para que a comunicação seja possível de acordo com a topologia da Figura 22.

Figura 25: Ilustração dos conceitos de nós em tráfego interno e externo: há dois pares de nós do *cluster* no canto superior esquerdo envolvidos em tráfego interno ao passo que há um par de nós no *cluster* superior esquerdo envolvido na comunicação com outros *clusters*.

O apêndice C ilustra um exemplo de como os parâmetros de entrada da ferramenta são ajustados. Nota-se que é possível inserir mais de um perfil de simulação, o que facilita a execução em série de diferentes tipos de experimentos.

4.1.3 Métricas

As métricas utilizadas na avaliação de convergência de simulação são:

- fluxos de tráfego: origem e destino na malha da simulação sem fio;
- *throughput*: número de pacotes transmitidos no intervalo de tempo t para cada fluxo sem fio;
- taxa de entrega: quantidade de pacotes efetivamente recebidos dividida pela quantidade de pacotes enviados;
- atraso médio: intervalo de tempo médio de percurso da origem até ao destino dos pacotes.

O cálculo do *throughput* e do atraso médio dos fluxos de tráfego utilizados no fluxo principal ferramenta de simulação descrito na seção 4.1.1 é efetuado conforme especificado na seção 2.4.

4.1.4 Algoritmo de convergência

Esta seção detalha os aspectos relacionados ao algoritmo de convergência utilizado no processo de simulação descrito na seção 4.1.1. O aspecto mais relevante acerca da convergência é que se trata de uma abordagem iterativa baseada na detecção dos fluxos de tráfego tanto na simulação de nós com fio quanto nas simulações com os nós sem fio, conforme ilustrado na Figura 23.

Os fluxos de tráfego da simulação com fio entre *clusters* são detectados a partir dos arquivos de *trace* do ns-2. Tais fluxos são amostrados e especificados em simulações sem fio com o mesmo *throughput* de aplicação medidos em cada intervalo de amostragem da simulação com fio. As métricas empregadas na análise das simulações com o objetivo de verificar convergência são as especificadas na seção 4.1.3.

O apêndice D ilustra parte do algoritmo de convergência. A plataforma de simulação utiliza o erro médio entre a simulação com fio e as simulações sem fio amostradas para verificar o quão similares são (linhas 167 a 219). O processo iterativo pára no momento em que a convergência é conseguida, ou seja, quando os mesmos fluxos de tráfego transportam pacotes com taxa de entrega e atraso médio com erros relativos abaixo dos valores dados nos parâmetros de simulação (linhas 211 a 218). No simulador, a valor da taxa de entrega é ajustado como sendo 1.0, o que significa taxa nula de perda de pacotes. No caso da convergência não ser conseguida, o simulador modifica alguns parâmetros de acordo com os resultados obtidos na última análise de convergência e inicia um novo processo de simulação e amostragem (linhas 259 a 469) . O simulador utiliza duas abordagens de conjuntos de parâmetros a serem modificados em cada iteração a fim de realizar a abordagem de convergência, apresentados a seguir:

- *throughput da aplicação CBR e tamanho da banda da simulação com fio*

(linhas 259 a 320) - este caso é utilizado a fim de conhecer o tamanho de banda da simulação sem fio ideal para um determinado conjunto de experimentos. A banda da simulação com fio depende do número total de nós da topologia e do *throughput* da aplicação. O simulador analisa a taxa de entrega e os dados de atraso médio e, com estes resultados, modifica respectivamente o *throughput* da aplicação CBR e o comprimento da banda com fio a fim de se obter uma solução convergente.

- *throughput da aplicação CBR e atraso da camada de enlace* (linhas 322 a 392) - este caso é empregado após a descoberta de uma banda com fio própria para um dado conjunto de perfis de simulação. O processo de análise é similar ao da abordagem anterior na qual o *throughput* da aplicação (usando a análise de resultados da taxa de entrega) e o atraso da camada de enlace (usando os dados de atraso médio) são modificados a fim de se obter uma solução convergente.

O algoritmo 1 descreve de maneira generalizada o procedimento de convergência empregado na plataforma de simulação. Os máximos aceitáveis para os erros relativos são ajustados nos parâmetros de entrada conforme especificado na seção 4.1.2.

4.2 Desenvolvimento

O sistema implementado pode ser resumido a partir do diagrama de componentes da Figura 26.

O subsistema de entrada consiste nas estruturas necessárias para interpretação dos parâmetros de entrada (seção 4.1.2). O *framework* engloba as funcionalidades necessárias para a integração com o simulador ns-2, bem como os componentes que elaboram os *scripts* de simulação. Além disso, no *framework* estão incluídas as estruturas necessárias para a identificação dos fluxos de tráfego e de cálculo das métricas especificadas na seção 4.1.3. O sistema de controle é composto pelos componentes de amostragem e de verificação de convergência. O componente de amostragem é responsável por dividir a simulação com fio pura em intervalos de tempo t menores que T , e

Algoritmo 1 Pseudocódigo do algoritmo de convergência

```

while simulação não converge AND não é número máximo de iterações do
  calcula atraso médio das  $T/t$  partes da simulação com fio
  calcula atraso médio das  $T/t$  simulações sem fio
  calcula taxa de entrega das  $T/t$  partes da simulação com fio
  calcula taxa de entrega das  $T/t$  simulações sem fio
  calcula erros relativos entre as taxas de entrega
  calcula erros relativos entre os atrasos médios
  if erro relativo da taxa de entrega > máximo aceitável then
    cálculo de novos parâmetros de simulação
    ← modifica-se o throughput médio das aplicações
  else
    if erro relativo do atraso médio > máximo aceitável then
      if abordagem de convergência item 1 then
        cálculo de novos parâmetros de simulação
        ← modifica-se o tamanho da banda da simulação com fio
      else
        cálculo de novos parâmetros de simulação
        ← modifica-se o atraso da camada de enlace
      end if
    else
      simulação convergiu
      ← sair do laço
    end if
  end if
end while

```

também por elaborar os *scripts* de simulação sem fio para o tráfego extra *cluster* em cada intervalo de tempo t . O módulo de convergência verifica se os resultados das métricas originadas pela simulação com fio pura são compatíveis com os das simulações sem fio. Finalmente o módulo de saída engloba a elaboração do relatório final de simulação. Além disso, também há as estruturas necessárias para a identificação dos fluxos de tráfego e cálculos de métricas conforme especificado na seção 4.1.4.

Como um passo final o subsistema de detalhamento do hardware é usado para o refinamento do simulador, reunindo dados relativos à dinâmica temporal da arquitetura do *switch* direcionada ao silício. Entre os os dados temporais destaca-se o tempo tomado para a transmissão de pacotes no caso do *switch* necessitar mudá-los de eixo (por exemplo: entrada pela porta leste e saída pela porta norte) ou simplesmente encaminhá-los ao próximo canal de transmissão. Há também o cálculo do ciclo de execução no caso em que o *switch*

Figura 26: Diagrama de componentes do simulador de redes em chip sem fio destacando-se os cinco principais subsistemas.

Adaptado de: Ferreira e Margi (2013)

encaminha os pacotes para o canal sem fio. A fim de realizar esta modelagem, ferramentas de modelagem arquiteturas de sistemas computacionais como o Gem5 (BINKERT *et al.*, 2011) podem ser utilizadas. É possível modelar a arquitetura dos *switches* usando os modelos de CPU do Gem5 e agregar tempos associados ao roteamento e de acesso à memória, aos caches, às latências de serialização e transmissão (conforme descrito na seção 2.4) e, com isso, aferir sua influência no desempenho geral do *switch* e na simulação da dinâmica dos nós em rede. O trecho de código 4.1 (SAIDI; HANSSON, 2012) ilustra como instanciar e configurar componentes no Gem5 permitindo um ambiente no qual é possível modelar e conectar componentes chaves de uma plataforma em hardware.

Trecho de Código 4.1: exemplo de configuração de modelo de CPU do Gem5.

```
class BaseCPU(MemObject) :
    icache_port = MasterPort("Instruction Port")
    dcache_port = MasterPort("Data Port")
    ...

class BaseCache(MemObject) :
    cpu_side = SlavePort("Port on side closer to CPU")
    mem_side = MasterPort("Port on side closer to MEM")
    ...

class Bus(MemObject) :
```

```

slave = VectorSlavePort("vector port for connecting masters")
master = VectorMasterPort("vector port for connecting slaves")
...
system.cpu.icache_port = system.icache.cpu_side
system.cpu.dcache_port = system.dcache.cpu_side
system.icache.mem_side = system.l2bus.slave
system.dcache.mem_side = system.l2bus.slave

```

Associando-se o simulador Gem5 a traces de *debugging* conforme ilustrado na figura 27 é possível obter um arquivo de saída com os valores temporais do sistema configurado em hardware. Estes valores podem ser agregados à plataforma de simulação por meio do parâmetro *link delay* do ns-2. A integração com a plataforma de simulação é feita por meio do subsistema de entrada conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 27: Exemplo de *trace* de um modelo de CPU no Gem5.

```

2:44:47 [ /work/gem5] head m5out/my_trace.out
50000: system.cpu: Decode: Decoded cmps instruction: 0xe353001e
50500: system.cpu: Decode: Decoded ldr instruction: 0x979ff103
51000: system.cpu: Decode: Decoded ldr instruction: 0xe5107004
51500: system.cpu: Decode: Decoded ldr instruction: 0xe4903008
52000: system.cpu: Decode: Decoded addi_uop instruction: 0xe4903008
52500: system.cpu: Decode: Decoded cmps instruction: 0xe3530000
53000: system.cpu: Decode: Decoded b instruction: 0x1affff84
53500: system.cpu: Decode: Decoded sub instruction: 0xe2433003
54000: system.cpu: Decode: Decoded cmps instruction: 0xe353001e
54500: system.cpu: Decode: Decoded ldr instruction: 0x979ff103

```

Fonte: Saidi e Hansson (2012)

A análise de consumo energético pode ser realizada por meio do emprego do simulador Orion (WANG *et al.*, 2002) empregando um *framework* parecido com o utilizado para integrar o ns-2. Por meio do Orion é possível utilizar um conjunto de modelos energéticos que foram desenvolvidos para diversos componentes de redes em chip. Por meio destes modelos é possível estimar o consumo energético da arquitetura do *switch*. A figura 28 ilustra alguns dos componentes com os quais é possível modelar um *switch* no Orion.

A primeira versão do Orion data de 2002 e era constituída de uma arquitetura padrão a partir de modelos da estrutura dos circuitos de cada componente do *switch* (seção 2.2). Em 2009 foi lançada a segunda versão a qual adicionou novos modelos de consumo energético para flip-flops e para os canais.

Figura 28: Componentes (*crossbar*, arbitragem e *buffers* de entrada e saída) da arquitetura do *switch* modelado no Orion.

Adaptado de: Wang *et al.* (2002)

Finalmente a terceira versão do Orion engloba mecanismos de refinamento do consumo energético tomados a partir de layouts de *Place and Routing* dos circuitos de cada componente os quais podem ser parametrizados com o objetivo de se aproximar o máximo possível de uma biblioteca específica de componentes em hardware na qual o chip será posteriormente projetado. É importante ressaltar que Orion também suporta modelagem não paramétrica conforme descrito por Kahng, Lin e Samadi (2010).

A arquitetura do *switch* sem fio pode ser especificada por meio dos arquivos de cabeçalho do Orion obtendo a contribuição energética de cada um das estruturas do *switch*, conforme descrito na seção 2.3. O canal sem fio, por exemplo, pode ser modelado por meio de um *buffer* central e a especificação da arquitetura de um novo *crossbar*. O consumo energético total da rede pode ser estimado por meio de experimentos com topologias conforme também especificado por Wang *et al.* (2002). Para isto deve ser implementado um módulo no Orion baseado no *design pattern* do tipo *factory* com o objetivo de decodificar entre os diferentes modelos de topologias.

4.3 Sinopse

A tabela 8 seção resume as principais características da plataforma de simulação descrita neste capítulo.

Tabela 8: Plataforma de simulação - principais aspectos

Aspecto	Descrição
fluxo principal	uso do ns-2 pela ferramenta de simulação por meio de um algoritmo de convergência de uma simulação com fio e um conjunto de simulações sem fio.
parâmetros	entrada de parâmetros feita por meio de um arquivo XML no qual se pode especificar aspectos relacionados ao tamanho da topologia, perfis de tráfego e aspectos relativos à arquitetura do <i>switch</i> .
métricas	fluxos de tráfego, <i>throughput</i> , taxa de entrega e atraso médio.
algoritmo de convergência	Iterativo, possuindo duas abordagens configuráveis. Consiste em transmitir a mesma quantidade de pacotes das mesmas fontes e destinos nos mesmos intervalos de tempo.

5 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os experimentos realizados, descrevendo os cenários e resultados obtidos com a plataforma de simulação especificada no capítulo 4. Avaliou-se o desempenho dos protocolos ad hoc de roteamento sem fio na seção 5.1 em diferentes cenários de tráfego interno e externo bem como em termos de número de saltos entre os emissores e receptores de dados. Além disso, na seção 5.2, há uma análise de como implementar os protocolos estudados neste trabalho em hardware, visando o uso em WiNoCs.

5.1 Desempenho de protocolos

Os experimentos envolvendo a análise de desempenho de protocolos foram feitos utilizando a topologia da Figura 22 descrita no capítulo 4. Foram feitos dois experimentos principais: um para avaliar o desempenho dos protocolos em diferentes configurações de fluxos de tráfego e o segundo para avaliar a influência do número total de nós no desempenho geral da NoC. Para a escolha da largura de banda da simulação com fio foi executado um conjunto de dez simulações (abrangendo perfis de topologia e tráfego dos experimentos principais), adotando-se a abordagem de convergência a qual modifica em cada iteração o *throughput* da aplicação CBR e tamanho da banda da simulação com fio (seção 4.1.4). Dessa forma foi possível obter uma largura de banda compatível com a topologia simulada, cujo valor foi de 0.25MB. A partir disso, utilizou-se a abordagem de convergência que modifica em cada iteração o *throughput* da aplicação CBR e atraso da camada de enlace para os experimentos principais (seção 4.1.4).

5.1.1 Perfis de tráfego interno e externos

No primeiro experimento os protocolos DSR, DSDV e AODV (seção 3.4) foram utilizados em uma topologia hierárquica composta por 9 clusters com 16 nós em cada um deles. No experimento, os perfis aleatórios de tráfego interno (dentro de um *cluster*) e externo (entre *clusters*) são variados ¹. Duas métricas foram avaliadas: o *throughput* e o atraso médio (seção 4.1.3). O número de nós intermediários foi ajustado para ser o maior possível. Em outras palavras, os emissores e receptores foram ajustados de tal forma a ficarem o mais longe possível. O tamanho de pacote adotado foi de 512 bytes transmitidos em um ritmo constante utilizando uma abordagem UDP. A distância entre os nós dotados de canal sem fio é ajustada de forma a estabelecer os padrões de comunicação na Figura 22. Para o acesso ao meio utilizou-se a especificação IEEE 802.11. Os nós com fio possuem uma fila de 2 nós e cada nó sem fio tem uma fila de 64 pacotes.

A Figura 29-a resume os resultados das simulação para protocolos de roteamento. Os resultados mostram que o *throughput* dos fluxos do canal sem fio é muito sensível ao tráfego externo sobre os canais sem fio e o desempenho da rede é significativamente afetado em cenários de alto tráfego externo, conforme esperado. Isso acontece porque o tempo de resposta do protocolo de roteamento sem fio é maior do que o roteamento fixo empregado no mecanismo com fio. Os resultados também mostram que protocolos reativos são mais indicados para cenários com baixo tráfego externo nos quais há poucos fluxos, dessa forma, sendo mais fáceis de ser gerenciados usando estratégias de roteamento sob demanda. O protocolo DSDV, o qual usa uma estratégia de roteamento ativa com envio periódico de mensagens contendo dados para as tabelas dos nós, demonstra um desempenho mais estável em todos os

¹Para se obter o número de nós em tráfego interno e externo a partir de suas respectivas porcentagens, basta multiplicar a porcentagem pelo número total de nós em um *cluster*. Após a multiplicação, aplicar a função piso. Divide-se o resultado da operação anterior por dois e aplica-se a função piso novamente. O resultado indica a quantidade de pares de nós engajados em tráfego interno ou externo. No cenário de tráfego interno de 10% e 80%, por exemplo, o número de pares de nós em tráfego interno é dado por $0.1 * 16 = 1.6$. O menor inteiro mais próximo de 1.6 é 1.0. Dividindo-se 1.0 por 2, obtém-se 0.5. Dessa forma não há pares de nós em tráfego interno, pois $\lfloor 0.5 \rfloor = 0$. Semelhantemente 80% de tráfego externo equivale dizer que há $\lfloor \frac{0.8 * 16}{2} \rfloor = 6$ pares de nós envolvidos em tráfego externo (seis nós fontes e seis nós destinos). Os nós centrais com canal sem fio em um *cluster* não estão configurados para serem emissores ou receptores de um determinado fluxo de tráfego, logo não é possível empregar 100% dos nós nos experimentos.

Figura 29: Resultados das métricas para os três protocolos simulados em diferentes perfis de fluxos de tráfego usando uma topologia de 16 nós x 9 *clusters*

cenários de tráfego, apesar de inferior ao dos outros dois protocolos. Os resultados também apontam que o desempenho da rede é sensivelmente inferior para cenários com mais de 60% de fluxos externos, isto é, os canais sem fio conseguem gerenciar com melhor eficácia até oito fluxos externos para cada *cluster* em uma topologia de 16 nós x 9 *clusters*².

A Figura 29-b resume o atraso médio para diferentes configurações de fluxos de tráfego interno e externo. O protocolo DSR demonstra que seu atraso médio é maior quando há maior tráfego externo, conforme esperado. Em cenários de tráfego externo elevado, as mensagens de controle de rota do protocolo DSR levam mais tempo para chegar aos seus destinos, afetando o desempenho geral dos fluxos. O AODV leva mais tempo para entregar os pacotes em cenários de elevado tráfego externo, como também em cenários de balanceados de tráfego externo e interno. A inflexão no protocolo AODV acontece por conta do protocolo ser mais sensível às mudanças nos fluxos de tráfego. Nos cenários de tráfego externo maior que 80%, o nó dotado de canal sem fio atua como gargalo, chaveando os fluxos de tráfego para fora do canal sem fio, o que aumenta o atraso médio. No cenário "20% int - 70% ext", não há este chaveamento frequente, diminuindo o atraso médio. Por outro lado, à medida que os fluxos de tráfego interno e externam se aproximam de uma configuração balanceada, há uma quantidade maior de fluxos de tráfego dentro do cluster, aumentando o *overhead* de gerenciamento. À medida que os fluxos de tráfego externo diminuem, os canais sem fio ficam menos ocupados e mais estáveis, ocasionando uma nova baixa no atraso médio. O protocolo DSDV exhibe constância no atraso médio em todos os cenários de tráfego demonstrando que protocolos de roteamento ativos possuem desempenho estável em topologias hierárquicas de WiNoCs.

5.1.2 Tamanho da rede e número de saltos

Para o experimento de tamanho da rede foram simulados diferentes configurações de topologias com perfis de tráfego internos e externos balanceados,

²60% de 16 nós engajados em tráfego externo é igual a $\lfloor \frac{0.6 \cdot 16}{2} \rfloor = 4$. Dessa forma, dentro de um *cluster*, há quatro nós fontes e quatro nós destinos comunicando-se com outros *clusters*, totalizando um total de oito nós envolvidos em tráfego externo por *cluster* para a topologia simulada.

isto é, 50% do total de nós que podem receber fluxos de tráfego em um *emph-cluster* engajados em tráfego interno e 50% engajados em tráfego externo. O perfil de número de saltos é analisado por meio da variação do número desejável de saltos para os fluxos internos e externos, conforme especificado na seção 4.1.2. Há três cenários de comunicação entre nós: *clusters* e comunicação interna de nós adjacentes, *clusters* separados por dois saltos e comunicação interna de nós separados por dois saltos e número máximo de saltos dentro e fora dos *clusters*.

Figura 30: Resultados das métricas em diferentes configurações de *clusters* em cenários balanceados de tráfego interno e externo

(a) *throughput* médio nos canais sem fio x tamanho da topologia em um cenário balanceado de tráfego dentro dos *clusters* (interno) e entre *clusters* (externo)

(b) Atraso médio dos fluxos de tráfego nos canais sem fio x tamanho da topologia em um cenário balanceado de tráfego dentro dos *clusters* (interno) e entre *clusters* (externo)

Os resultados exibidos na Figura 30 avaliam os efeitos do tamanho da rede em uma WiNoC com diferentes estratégias de roteamento. As topologias são simuladas usando o protocolo DSR por ser mais simples e de mais facilidade para implementação do roteamento dinâmico em chip. É importante ressaltar que a topologia 4x4 tem *throughput* zero porque é muito pequena para se beneficiar dos efeitos dos canais sem fio. Como o número de saltos é similar em canais com fio e sem fio, é conveniente utilizar somente o roteamento com fio. A Figura 30-a exibe não somente os efeitos do tamanho da topologia sobre os canais sem fio como também o impacto sobre a distância, em saltos, entre a fonte e o destino dos fluxos. Quando a comunicação é predominante entre *clusters* adjacentes (1-hop) o *throughput* médio sobre os canais sem fio é superior. As diferenças entre os perfis de tráfego com dois saltos e com o máximo número de saltos não são expressivas para topologias pequenas, contudo, é possível perceber que o *throughput* da aplicação é sensivelmente menor em topologias com mais de 81 nós por conta do aumento do número de requisições de acesso ao meio dos canais sem fio.

A Figura 30-b exibe os resultados do atraso médio para topologias e fluxos de tráfego distintos. Nota-se o efeito visível do número de saltos no desempenho geral do atraso do canal sem fio.

5.2 Empregando protocolos ad hoc sem fio em WiNoCs

Implementações em hardware de protocolos clássicos podem ser encontradas para o AODV (RAMAKRISHNAN; SHANMUGAVEL, 2006a) e para o DSDV (RAMAKRISHNAN; SHANMUGAVEL, 2006b). Contudo, os requisitos envolvendo o uso de tais protocolos para WiNoC são mais simples uma vez que os nós não se movimentam, o que simplifica sua concepção e complexidade. O acesso ao canal sem fio é primeiramente decidido por meio da análise se as posições de origem e destino são maiores que a aresta de um *cluster*. Em segundo lugar, um pacote é aceito no canal sem fio quando: o seu *buffer* não está cheio o suficiente para admitir outro fluxo de tráfego e há uma rota para o *cluster* de destino. Esta decisão é feita por meio da consulta de uma tabela principal na qual há todos os nós inativos e ocupados. No momento em

que os nós tornam-se gargalos devido ao excessivo tráfego entre os *clusters* ou quando uma rota para o *cluster* de destino não está disponível, o tráfego flui apenas pelos canais com fio. Além disso esta tabela principal é usada para ligar os nós baseado em um número mínimo de nós ativos com o objetivo de evitar que todos os nós sem fio sejam desligados com o decorrer do tempo.

Com uma abordagem similar à adotada por Zhao e Wang (2008) para desenvolver um protocolo de acesso ao meio, é possível estabelecer duas fases principais para o funcionamento dos protocolos: recálculo de rota e transferência de dados. O recálculo de rota é ativado quando qualquer nó sem fio é ligado ou quando um *buffer* sem fio está ocupado, o que significa que o nó em questão não é capaz de admitir mais fluxos de tráfego. O *deadlock* pode ser evitado por meio de uma ordenação de *buffers* simples conforme explicado por Zhao e Wu (2012).

A transferência periódica de tabelas no DSDV poderia ser desativada. Para a sua aplicação em WiNoC, a atualização das tabelas de roteamento é somente necessária na fase de recálculo de rota, seguida por atualizações parciais quando os nós são desligados ou ligados. O uso do protocolo DSR em WiNoC necessita somente de um mecanismo de descoberta de rotas a ser realizado durante o recálculo de rotas. As mensagens RREP retornarão a rota para o nó emissor a qual será armazenada em tabelas de cache de rotas, ativando a comunicação subsequente.

Similarmente para o emprego do protocolo AODV em WiNoC somente há a necessidade das mensagens RREQ e RREP, pois os nós são estacionários no chip. As tabelas de roteamento do AODV necessitam ser atualizadas somente durante a fase de recálculo de rota, sendo que as rotas serão utilizadas até a ocorrência de um novo evento que ative o recálculo de rota.

5.3 Sinopse

Esta seção resume os aspectos principais discutidos neste capítulo.

A Tabela 9 sintetiza os pontos principais acerca da análise de resultados.

A Tabela 10 sintetiza os pontos principais discutidos para o emprego de

Tabela 9: Análise de resultados - pontos principais

Aspecto	Análise
protocolos de roteamento reativo (DSR e AODV)	são mais indicados em cenários com baixo tráfego entre <i>clusters</i> . Desempenho do AODV revelou-se sensível à frequência das mudanças dos fluxos de tráfego
protocolo de roteamento ativo (DSDV)	demonstrou desempenho inferior, contudo estável, para os diferentes perfis de tráfego simulados
canais sem fio	desempenho é menor quando o tráfego externo supera 60% do total de nós do <i>cluster</i>
tamanho da rede	redes com mais de 81 nós possuem <i>throughput</i> sensivelmente menor por conta do elevado número de requisições de acesso ao meio

protocolos ad hoc sem fio em WiNoCs.

Tabela 10: Emprego de protocolos ad hoc sem fio em WiNoCs - pontos principais

Aspecto	Descrição
simplificações	aspectos relativos à mobilidade característicos dos protocolos devem ser ignorados em WiNoCs, pois os nós não se movem
roteamento em duas fases	recálculo de rota e transferência de dados
tabela principal de roteamento	reúne informações acerca da atividade dos nós com canal sem fio. Também é útil para ajudar a manter um número mínimo de nós com canal sem fio em atividade

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho forneceu um panorama geral acerca do paradigma das redes em chip sem fio (WiNoCs), abordando conceitos acerca da arquitetura dos *switches*, da modelagem e da simulação de NoCs e WiNoCs como também a respeito da disposição dos nós com canal sem fio na rede.

Além disso, foi possível elaborar cenários de simulação de WiNoCs utilizando protocolos ativos e reativos no ns-2, conforme proposto. Também foi possível abordar aspectos de simulação relativos ao acesso ao meio, ao tamanho da rede e ao roteamento em topologias hierárquicas de WiNoCs. As partir dos dados das simulações foi possível obter visão geral da dinâmica das redes em chip sem fio usando protocolos ad hoc de roteamento dinâmico.

Além das discussões acerca da topologia e do número de saltos relatadas no capítulo 5, os resultados também demonstraram que os *clusters* de WiNoC com oito ou mais nós engajados em comunicação entre *clusters* (60% ou mais de tráfego externo em um *cluster* de 16 nós) possuem seu desempenho geral significativamente degradados. Na figura 29, percebe-se que em cenários cujo tráfego externo entre *clusters* excede 60%, há queda no desempenho do DSR seguida pela queda do DSDV. O protocolo DSDV mostrou-se com um desempenho superior, comparado ao DSR e ao AODV, para o roteamento em redes em chip sem fio hierárquicas. Tal protocolo obteve desempenho estável em diferentes perfis de tráfego e tamanhos de topologias. Os pacotes do protocolo DSDV também demonstraram um menor atraso médio, se comparados com os pacotes dos protocolos DSR e AODV.

Em um contexto de uso de simuladores próprios e de aplicação específica em redes em chip sem fio, este trabalho abre as portas para uma plataforma flexível a qual permite a modelagem da dinâmica dos nós em rede a partir de um aparato consolidado e muito difundido na literatura. Associada a ferramen-

tas de modelagem de arquiteturas em hardware (BINKERT *et al.*, 2011) e de consumo energético (WANG *et al.*, 2002) é possível realizar estudos com um aprofundado nível de detalhe abrangendo todos os aspectos não somente da dinâmica da rede como de aspectos individuais dos *switches* da rede.

6.1 Publicações

O artigo científico publicado com informações acerca desta pesquisa de mestrado foi:

- **Ferreira, J. C.;** Margi, Cíntia B.. *Simulação de redes em chip sem fio*. In: IV Escola Regional de Alto Desempenho de São Paulo (ERAD-SP 2013). São Carlos - SP: Sociedade Brasileira de Computação, 2013. p. 74-77;

Um segundo artigo encontra-se em elaboração para submissão para periódico, e destaca os resultados obtidos com a ferramenta proposta.

6.2 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros incluem uma comparação entre o simulador proposto no capítulo 4, cujo código-fonte pode ser baixado no link (FERREIRA, 2014), com diferentes propostas de WiNoC e abordagens de topologias (YOON; PARK, 2005; WU; WANG; ZHAO, 2010; ZHAO; WU, 2012), elaborando mais cenários para explorar futuros aspectos na simulação de WiNoC, Alguns exemplos de simulação são camadas sem-fio totalmente conectadas, topologias *small-world* incompletas e a desativação de nós sem fio para economia de energia.

Há também a expansão do simulador para sua integração com ferramentas de análise de consumo energético, muito importantes para a avaliação de desempenho de uma NoC (seção 2.4). Com a ferramenta de simulação consolidada, abre-se a possibilidade de usar a plataforma de simulação para modelar e avaliar um mecanismo de roteamento baseado no protocolo DSDV do ns-2, o qual obteve o desempenho mais estável nos experimentos do capítulo

5. Tal mecanismo, abordado seção 5.2, possui como principal objetivo de guiar implementações em hardware (FPGA) de *switches* dotados de roteamento dinâmico com o objetivo de poupar energia (seção 3.3) em um ambiente de co-simulação.

REFERÊNCIAS

- ADDISON, P. *Fractals and Chaos: An illustrated course*. Abingdon, Oxford, Reino Unido: Taylor & Francis, 1997. ISBN 9780849384431.
- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, v. 406, n. 6794, p. 378–382, 2000.
- BALIARDA, C. P.; ROMEU, J.; CARDAMA, A. The koch monopole: A small fractal antenna. *Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 48, n. 11, p. 1773–1781, 2000.
- BENINI, L.; MICHELI, G. D. Networks on chips: A new soc paradigm. *Computer*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, EUA, v. 35, n. 1, p. 70–78, janeiro 2002.
- BINKERT, N.; BECKMANN, B.; BLACK, G.; REINHARDT, S. K.; SAIDI, A.; BASU, A.; HESTNESS, J.; HOWER, D. R.; KRISHNA, T.; SARDASHTI, S.; SEN, R.; SEWELL, K.; SHOAIB, M.; VAISH, N.; HILL, M. D.; WOOD, D. A. The gem5 simulator. *SIGARCH Computer Architecture News*, ACM, Nova Iorque, NY, EUA, v. 39, n. 2, p. 1–7, 2011.
- BUECHLER, J.; KASPER, E.; RUSSER, P.; STROHM, K. M. Silicon high-resistivity-substrate millimeter-wave technology. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 34, n. 12, p. 1516–1521, 1986.
- BURKE, P.; YU, Z.; RUTHERGLEN, C. Carbon nanotubes for rf and microwaves. In: *Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2005. p. 1–4.
- CHANG, K.; DEB, S.; GANGULY, A.; YU, X.; SAH, S. P.; PANDE, P. P.; BELZER, B.; HEO, D. Performance evaluation and design trade-offs for wireless network-on-chip architectures. *Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, ACM, Nova Iorque, NY, EUA, p. 23:1–23:25, 2012.
- CRAIK, C. J.; MUTLU, O. *Investigating the Viability of Bufferless NoCs in Modern Chip Multi-processor Systems*. Pittsburgh, EUA, 2011.
- DALLY, W. Virtual-channel flow control. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Los Alamitos, CA, EUA, v. 3, n. 2, p. 194–205, 1992.
- DALLY, W. J. Express cubes: Improving the performance of k-ary n-cube interconnection networks. *Transactions on Computers*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 40, n. 9, p. 1016–1023, 1991.

DEB, S.; GANGULY, A.; PANDE, P.; BELZER, B.; HEO, D. Wireless noc as interconnection backbone for multicore chips: Promises and challenges. *Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 228–239, 2012.

ERBAS, C. *System-level modeling and design space exploration for multiprocessor embedded System-on-Chip architectures*. Tese (Doutorado) — Informatics Institute, Univ. of Amsterdam, Nov. 2006.

FALLIN, C.; CRAIK, C.; MUTLU, O. Chipper: A low-complexity bufferless deflection router. In: *17th International Conference on High-Performance Computer Architecture*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE Computer Society, 2011. p. 144–155.

FALLIN, C.; NAZARIO, G.; YU, X.; CHANG, K.; AUSAVARUNGNIIRUN, R.; MUTLU, O. Minbd: Minimally-buffered deflection routing for energy-efficient interconnect. In: *Sixth International Symposium on Networks on Chip (NoCS)*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE/ACM, 2012. p. 1–10.

FERREIRA, J. C. *WiNoC simulator source code*. juin 2014. Disponível em: <https://github.com/jefchavesfer/ns2-int>. Acesso em: 14 jun. 2014.

FERREIRA, J. C.; MARGI, C. B. Simulação de redes em chip sem fio. In: *Escola Regional de Alto Desempenho de São Paulo*. Porto Alegre, RS, Brasil: Sociedade Brasileira de Computação, 2013.

FLOYD, B. *A CMOS Wireless Interconnect System for Multigigahertz Clock Distribution*. Flórida, EUA: University of Florida, 2001.

GANGULY, A.; CHANG, K.; DEB, S.; PANDE, P.; BELZER, B.; TEUSCHER, C. Scalable hybrid wireless network-on-chip architectures for multicore systems. *Transactions on Computers*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 60, n. 10, p. 1485–1502, 2011.

GANGULY, A.; WETTIN, P.; CHANG, K.; PANDE, P. Complex network inspired fault-tolerant noc architectures with wireless links. In: *Fifth International Symposium on Networks on Chip (NoCS)*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2011. p. 169–176.

GROT, B.; HESTNESS, J.; KECKLER, S. W.; MUTLU, O. Express cube topologies for on-chip interconnects. In: *15th International Symposium on High Performance Computer Architecture*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2009. p. 163–174.

GUERRIER, P.; GREINER, A. A generic architecture for on-chip packet-switched interconnections. In: *Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2000. p. 250–256.

HUANG, Y.; YIN, W.-Y.; LIU, Q. H. Performance prediction of carbon nanotube bundle dipole antennas. *Transactions on Nanotechnology*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 7, n. 3, p. 331–337, May 2008.

IEEE. IEEE standard for information technology- telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11-1997*, p. i–445, 1997.

ISI. *Creating Wired-cum-Wireless and MobileIP Simulations in ns*. novembro 2011. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/nsscript6.html>>. Acesso em: 27 jun. 2013.

_____. *The Network Simulator - ns-2*. novembro 2011. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: 27 jun. 2013.

JOHNSON, D. B.; MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: *Mobile Computing*. Dordrecht, Países Baixos: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 153–181.

JUNG, W. *Op Amp Applications Handbook*. San Francisco, Califórnia, Estados Unidos: Newnes/Elsevier, 2005. (Analog Devices series). ISBN 9780750678445.

KAHNG, A.; LIN, B.; SAMADI, K. Improved on-chip router analytical power and area modeling. In: *15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2010. p. 241–246.

KEMPA, K.; RYBCZYNSKI, J.; HUANG, Z.; GREGORCZYK, K.; VIDAN, A.; KIMBALL, B.; CARLSON, J.; BENHAM, G.; WANG, Y.; HERCZYNSKI, A.; REN, Z. Carbon nanotubes as optical antennae. *Advanced Materials*, WILEY-VCH Verlag, v. 19, n. 3, p. 421–426, 2007.

KESHAV, S. *REAL 5.0 Overview*. agosto 1997. Disponível em: <<http://www.cs.cornell.edu/skeshav/real/overview.html>>. Acesso em: 4 ago. 2013.

KIM, J. Low-cost router microarchitecture for on-chip networks. In: *Proceedings of the 42nd Annual International Symposium on Microarchitecture*. Nova Iorque, NY, EUA: IEEE/ACM, 2009. (MICRO 42), p. 255–266.

KIM, J.; BALFOUR, J.; DALLY, W. J. Flattened butterfly topology for on-chip networks. *Computer Architecture Letters*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, EUA, v. 6, n. 2, p. 37–40, 2007.

KIM, J.; DALLY, W. J.; ABTS, D. Flattened butterfly: A cost-efficient topology for high-radix networks. *SIGARCH Computer Architecture News*, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 2, p. 126–137, 2007.

KIMOTO, K.; WATANABE, S.; KIKKAWA, T.; HALL, P.; YUAN, V. Characteristics of fractal dipole antennas integrated on si for ulsi wireless interconnects. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2004. v. 4, p. 3437–3440.

KOKSAL, C. E.; EKICI, E. Applications and performance of a nanoreceiver with a carbon nanotube antenna forest. *Wireless Communications*, IEEE, v. 19, n. 5, p. 52–57, 2012.

KUMAR, A.; KUNDU, P.; SINGH, A. P.; PEH, L. shiuan; JHA, N. K. A 4.6tbits/s 3.6ghz single-cycle noc router with a novel switch allocator in 65nm cmos. In: *25th International Conference on Computer Design*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2007. p. 63–70.

KUMAR, R.; GAIKWAD, S. On the design of nano-arm fractal antenna for uwb wireless applications. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, scielo, São Paulo, Brasil, v. 12, p. 158 – 171, 2013.

KUMAR, S.; JANTSCH, A.; SOININEN, J.-P.; FORSELL, M.; MILLBERG, M.; OBERG, J.; TIENSYRJA, K.; HEMANI, A. A network on chip architecture and design methodology. In: *Annual Symposium on VLSI, 2002. Proceedings*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2002. p. 105–112.

LIN, J.; WU, H.-T.; O, K. K. Compact on-chip monopole antennas on 20-/spl omega/-cm silicon substrates for operation in the 5.8-ghz ism band. In: *International Electron Devices Meeting, 2005. IEDM Technical Digest*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2005. p. 947–950.

LIN, J.; WU, H.-T.; SU, Y.; GAO, L.; SUGAVANAM, A.; BREWER, J.; O, K. Communication using antennas fabricated in silicon integrated circuits. *Journal of Solid-State Circuits*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 42, n. 8, p. 1678–1687, 2007.

MANOHAR, R.; ; MANOHAR, R.; KELLY, C. Network on a chip: Modeling wireless networks with asynchronous vlsi. *Communications Magazine*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 39, p. 149–155, 2001.

MEDHI, D.; RAMASAMY, K. *Network routing - algorithms, protocols, and architectures*. Burlington, EUA: Morgan Kaufmann, 2007. ISBN 978-0-12-088588-6.

MOSCIBRODA, T.; MUTLU, O. A case for bufferless routing in on-chip networks. *SIGARCH Computer Architecture News*, ACM, Nova Iorque, NY, EUA, p. 196–207, 2009.

MOTAMEDI, K.; IOANNIDES, N.; RÜMMELI, M.; SCHAGAEV, I. Reconfigurable network on chip architecture for aerospace applications. In: *Proc. of the 30th IFAC Workshop on Real-Time Programming and 4th International Workshop on Real-Time Software*. Varsóvia, Polônia: Polish Information Processing Society, 2009. p. 131–136.

NA, Y.; XIAO-WEI, S. Analysis of the multiband behavior on sierpinski carpet fractal antennas. In: *Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2005. v. 4, p. 4 pp.—.

NI, L. M.; MCKINLEY, P. K. A survey of wormhole routing techniques in direct networks. *Computer*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 26, n. 2, p. 62–76, 1993.

NYCHIS, G. P.; FALLIN, C.; MOSCIBRODA, T.; MUTLU, O.; SESHAN, S. On-chip networks from a networking perspective: congestion and scalability in many-core interconnects. In: *Proceedings of the SIGCOMM conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. Nova lorque, NY, EUA: ACM, 2012. p. 407–418.

O., K. K.; KIM, K.; FLOYD, B.; MEHTA, J.; YOON, H.; HUNG, C.-M.; BRAVO, D.; DICKSON, T.; GUO, X.; LI, R.; TRICHY, N.; CASERTA, J.; BOMSTAD W.R., I.; BRANCH, J.; YANG, D.-J.; BOHORQUEZ, J.; SEOK, E.; GAO, L.; SUGAVANAM, A.; LIN, J.-J.; CHEN, J.; BREWER, J. On-chip antennas in silicon ics and their application. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Los Alamitos, CA, EUA, p. 1312 – 1323, 2005.

OGRAS, U.; MARCULESCU, R. "it's a small world after all": Noc performance optimization via long-range link insertion. *Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Los Alamitos, CA, EUA, v. 14, n. 7, p. 693–706, 2006.

OGRAS, U. Y.; HU, J.; MARCULESCU, R. Key research problems in noc design: a holistic perspective. In: *Proceedings of the 3rd international conference on Hardware/software codesign and system synthesis*. Nova lorque, NY, EUA: IEEE/ACM/IFIP, 2005. p. 69–74.

PERKINS, C. E.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsdv) for mobile computers. In: ACM. *SIGCOMM Computer Communication Review*. Nova lorque, NY, EUA, 1994. v. 24, n. 4, p. 234–244.

PERKINS, C. E.; ROYER, E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: IEEE. *Second Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. Los Alamitos, CA, EUA, 1999. p. 90–100.

PUENTE, C.; ROMEU, J.; POUS, R.; RAMIS, J.; HIJAZO, A. Small but long koch fractal monopole. *Electronics Letters*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 34, n. 1, p. 9–10, Jan 1998.

RAMAKRISHNAN, M.; SHANMUGAVEL, S. Fpga implementation of aodv routing protocol in manet. In: *First International Conference on Industrial and Information Systems*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2006. p. 470–473.

_____. Fpga implementation of dsdv based router in mobile adhoc network. In: *Annual India Conference*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2006. p. 1–5.

RAZAVI, B.; AYTUR, T.; LAM, C.; YANG, F.-R.; LI, K.-Y.; YAN, R.-H.; KANG, H.-C.; HSU, C.-C.; LEE, C.-C. A uwb cmos transceiver. *Journal of Solid-State Circuits*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 40, n. 12, p. 2555–2562, 2005.

REBEIZ, G.; KATEHI, L.; ALI-AHMAD, W.; ELEFThERIADES, G.; LING, C. Integrated horn antennas for millimeter-wave applications. *Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 34, n. 1, p. 7–16, 1992.

RICE. *The Rice University Monarch Project*. outubro 2004. Disponível em: <<http://www.monarch.cs.rice.edu/>>. Acesso em: 4 ago. 2013.

SAHA, P.; SASAKI, N.; KIKKAWA, T. A single-chip gaussian monocycle pulse transmitter using 0.18 μm cmos technology for intra/interchip uwb communication. In: *2006 Symposium on VLSI Circuits, 2006. Digest of Technical Papers*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2006. p. 204–205.

SAIDI, A.; HANSSON, A. *Simulating Systems, not Benchmarks*. 2012. Disponível em: <http://gem5.org/dist/tutorials/hipeac2012/gem5_hipeac.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2015.

SASAKI, N.; KIMOTO, K.; MORIYAMA, W.; KIKKAWA, T. A single-chip ultra-wideband receiver with silicon integrated antennas for inter-chip wireless interconnection. *Journal of Solid-State Circuits*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 44, n. 2, p. 382–393, 2009.

SCHAFER, M.; HOLLSTEIN, T.; ZIMMER, H.; GLESNER, M. Deadlock-free routing and component placement for irregular mesh-based networks-on-chip. In: *International Conference on Computer-Aided Design. ICCAD*. New York, NY, USA: ACM, 2005. p. 238–245.

SHI, Z.; BURNS, A. Real-time communication analysis for on-chip networks with wormhole switching. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Networks-on-Chip*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE Computer Society, 2008. p. 161–170.

USC. *VINT Project Overview*. outubro 1997. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/vint/project_overview.htm>. Acesso em: 4 ago. 2013.

WANG, H.-S.; ZHU, X.; PEH, L.-S.; MALIK, S. Orion: a power-performance simulator for interconnection networks. In: *35th Annual International Symposium on Microarchitecture*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE/ACM, 2002. p. 294–305.

WANG, Y.; KEMPA, K.; KIMBALL, B.; CARLSON, J. B.; BENHAM, G.; LI, W. Z.; KEMPA, T.; RYBCZYNSKI, J.; HERCZYNSKI, A.; REN, Z. F. Receiving and transmitting light-like radio waves: Antenna effect in arrays of aligned carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, v. 85, n. 13, p. 2607–2609, 2004.

WATANABE, S.; KIMOTO, K.; KIKKAWA, T. Transient characteristics of integrated dipole antennas on silicon for ultra wideband wireless interconnects. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2004. v. 3, p. 2277 – 2280.

WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, v. 393, n. 6684, p. 409–10, 1998.

WENTWORTH, S. *Eletromagnetismo aplicado: Abordagem antecipada das linhas de transmissão*. Porto Alegre, RS, Brasil: Bookman, 2008. ISBN 9788577804269.

WILTON, S. J. E.; SALEH, R. Programmable logic ip cores in soc design: opportunities and challenges. In: *Conference on Custom Integrated Circuits*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE, 2001. p. 63–66.

WU, R.; WANG, Y.; ZHAO, D. A low-cost deadlock-free design of minimal-table rerouted xy-routing for irregular wireless nocs. In: *Fourth International Symposium on Networks-on-Chip (NOCS)*. Los Alamitos, CA, EUA: ACM/IEEE, 2010. p. 199 –206.

YOON, S.-R.; PARK, S.-C. Simulation and analysis of network on chip architecture for wireless communication system. In: *Proceedings of the Fifth International Workshop on System-on-Chip for Real-Time Applications*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE Computer Society, 2005. (IWSOC '05), p. 471–475.

ZHAO, D.; WANG, Y. Sd-mac: Design and synthesis of a hardware-efficient collision-free qos-aware mac protocol for wireless network-on-chip. *Transactions on Computers*, IEEE, Los Alamitos, CA, EUA, v. 57, n. 9, p. 1230–1245, 2008.

ZHAO, D.; WANG, Y.; LI, J.; KIKKAWA, T. Design of multi-channel wireless noc to improve on-chip communication capacity. In: *Fifth International Symposium on Networks on Chip (NoCS)*. [S.l.: s.n.], 2011.

ZHAO, D.; WU, R. Overlaid mesh topology design and deadlock free routing in wireless network-on-chip. In: *Proceedings of the 2012 Sixth International Symposium on Networks-on-Chip*. Los Alamitos, CA, EUA: IEEE Computer Society, 2012. p. 27–34.

APÊNDICE A – EXEMPLO DE SCRIPT DA SIMULAÇÃO COM FIO

Trecho de Código A.1: script TCL da simulação com fio gerado automaticamente pela plataforma de simulação do capítulo 4.

```

1 set nc 9 ;# number of clusters
2 set nn 9 ;# total number of src/router nodes in each cluster
3 set distNodes 100 ;# distande between cluster nodes
4
5 #Topology calculations
6 set x [expr int(sqrt($nn))]
7 set xc [expr int(sqrt($nc))]
8
9 set initialX 100
10 set initialY [expr $x * $xc * $distNodes + $initialX]
11 set initialZ 0
12
13 #area
14 set val(x) [expr $initialX + ( $x * $xc + 1 ) * $distNodes ]
15 set val(y) [expr $initialY + ( $x ) * $distNodes]
16
17 set clusterinternaltraffic 0.5 ; #percent of cluster size busy with internal communication
18
19 set clusterexternaltraffic 0.4 ; #percent of cluster size busy with external communication
20
21 set clNodeIntAct [expr int($nn * $clusterinternaltraffic/2)] ;# the number of nodes doing internal
    communication by cluster
22
23 set clNodeExtAct [expr int($nn * $clusterexternaltraffic/2)] ;# the number of nodes doing external
    communication by cluster
24
25 #CBR parameters
26 set cbrPacketSize 512
27 set cbrPacketInterval 0.2
28
29 #NoC position (center of the topology)
30 set xCluster [expr ($x + 1) / 2 - 1]
31 set yCluster [expr ($x + 1) / 2 - 1]
32
33 # Create a simulator object
34 set Nocns [new Simulator]
35
36 #Open simulation exit file
37 set tracefd [open simulacaoComFio.tr w]
38 #Open the NAM trace file
39 set namtrace [open simulacaoComFio.nam w]
40 $Nocns trace-all $tracefd
41 $Nocns namtrace-all $namtrace
42
43 # set up topography object
44 set topo [new Topography]
45 $topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

```



```

46
47 #Creating god
48 create-god [expr $nc * $nn]
49
50 set max_bandwidth 0.25Mb
51 set buffSize 2
52 set linkDelay 0.25ms
53
54 #total mesh
55 for {set cl 0} {$cl < $nc} {incr cl} {
56     for {set i 0} {$i < $x} {incr i} {
57         for {set j 0} {$j < $x} {incr j} {
58             #setting element number
59             set nEl [expr $i * $x + $j]
60             set r($cl$i$j) [$Nocns node]
61             #set r($cl$i$j) [$Nocns node [lindex 0.$cl.$nEl]]
62             $r($cl$i$j) shape square
63             puts "node r($cl$i$j) created. Index: 0.$cl.$nEl"
64         }
65     }
66 }
67
68 #shotcuts
69 set maxCoord [expr $x * $xc]
70 for {set i 0} {$i < $nc} {incr i} {
71     #for each cluster coordinate calculation
72     set xNode [expr int($i % $nc) * $xc + $xCluster]
73     set yNode [expr int($i / $nc) * $xc + $yCluster]
74
75     #right cluster
76     set rc [expr $i + 1]
77
78     #down cluster
79     set dc [expr $i + $xc]
80
81     #down-right cluster
82     set drc [expr $i + $xc + 1]
83
84     #down-left cluster
85     set dlc [expr $i + $xc - 1]
86
87     #making connections, if possible
88     set maxInLine [expr $xc * (int($i / $xc) + 1)]
89     set minInNextLine [expr $maxInLine - 1]
90     set maxInNextLine [expr $minInNextLine + $xc + 1]
91
92     if { $rc < $maxInLine } {
93         $Nocns duplex-link $r($i$xCluster$yCluster) $r($rc$xCluster$yCluster) $max_bandwidth $linkDelay
94         DropTail
95         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($rc$xCluster$yCluster) orient right
96         $Nocns queue-limit $r($i$xCluster$yCluster) $r($rc$xCluster$yCluster) $buffSize
97         $Nocns queue-limit $r($rc$xCluster$yCluster) $r($i$xCluster$yCluster) $buffSize ;#double direction
98         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($rc$xCluster$yCluster) queuePos 0.5
99     }
100     if { $dc < $nc } {
101         $Nocns duplex-link $r($i$xCluster$yCluster) $r($dc$xCluster$yCluster) $max_bandwidth $linkDelay
102         DropTail
103         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($dc$xCluster$yCluster) orient down
104         $Nocns queue-limit $r($i$xCluster$yCluster) $r($dc$xCluster$yCluster) $buffSize
105         $Nocns queue-limit $r($dc$xCluster$yCluster) $r($i$xCluster$yCluster) $buffSize ;#double direction
106         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($dc$xCluster$yCluster) queuePos 0.5
107     }
108     if { $drc < $nc && $drc < $maxInNextLine } {
109         $Nocns duplex-link $r($i$xCluster$yCluster) $r($drc$xCluster$yCluster) $max_bandwidth $linkDelay
110         DropTail
111         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($drc$xCluster$yCluster) orient down-right
112         $Nocns queue-limit $r($i$xCluster$yCluster) $r($drc$xCluster$yCluster) $buffSize
113         $Nocns queue-limit $r($drc$xCluster$yCluster) $r($i$xCluster$yCluster) $buffSize ;#double +direction
114         $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($drc$xCluster$yCluster) queuePos 0.5
115     }
116 }

```

```

114 if { $dlc > $minInNextLine && $dlc < $nc } {
115     $Nocns duplex-link $r($i$xCluster$yCluster) $r($dlc$xCluster$yCluster) $max_bandwidth $linkDelay
        DropTail
116     $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($dlc$xCluster$yCluster) orient down-left
117     $Nocns queue-limit $r($i$xCluster$yCluster) $r($dlc$xCluster$yCluster) $buffSize
118     $Nocns queue-limit $r($dlc$xCluster$yCluster) $r($i$xCluster$yCluster) $buffSize ;#double direction
119     $Nocns duplex-link-op $r($i$xCluster$yCluster) $r($dlc$xCluster$yCluster) queuePos 0.5
120 }
121 }
122 #create links between nodes
123 #mesh with shortcuts topology
124 set ctrl 0
125 #mesh connections
126 for {set cl 0} {$cl < $nc} {incr cl} {
127     for {set i 0} {$i < $x} {incr i} {
128         for {set j 0} {$j < $x} {incr j} {
129             #right node
130             set rn [expr $j + 1]
131             set ctrl [expr $ctrl + 1]
132             #down node
133             set dn [expr $i + 1]
134             puts "rn: $rn , x: $x , cl: $cl, i: $i, j: $j"
135             if { $rn < $x } {
136                 puts "entrei no normal"
137                 #has simple right connection
138                 puts "r([expr $cl][expr $i][expr $j]) r([expr $cl][expr $i][expr $rn])"
139                 $Nocns duplex-link $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $rn]) $max_bandwidth
                    $linkDelay DropTail
140                 $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $rn]) orient
                    right
141                 $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $rn]) $buffSize
142                 $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $i][expr $rn]) $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $buffSize
143                 $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $rn]) queuePos 0
                    .5
144             } else {
145                 if { [expr $cl % $xc] != [expr $xc - 1] } {
146                     #right cluster
147                     set rc [expr $cl + 1]
148                     puts "rc: $rc , xc: $xc"
149                     #has right cluster connection
150                     $Nocns duplex-link $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $rc][expr $i]0) $max_bandwidth
                        $linkDelay DropTail
151                     $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $rc][expr $i]0) orient right
152                     $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $rc][expr $i]0) $buffSize
153                     $Nocns queue-limit $r([expr $rc][expr $i]0) $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $buffSize
154                     $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $rc][expr $i]0) queuePos 0.5
155                 }
156             }
157             if { $dn < $x } {
158                 #has simple down connection
159                 $Nocns duplex-link $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $dn][expr $j])
                    $max_bandwidth $linkDelay DropTail
160                 $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $dn][expr $j]) orient down
161                 $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $dn][expr $j]) $buffSize
162                 $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $dn][expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $buffSize
163                 $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $cl][expr $dn][expr $j]) queuePos 0
                    .5
164             } else {
165                 #down cluster
166                 set dc [expr $cl + $xc]
167                 if { $dc < $nc } {
168                     #has down cluster connection
169                     puts "dc: $dc, nc: $nc, cl: $cl, i: $i, j: $j"
170                     $Nocns duplex-link $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $dc]0[expr $j]) $max_bandwidth
                        $linkDelay DropTail
171                     $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $dc]0[expr $j]) orient down
172                     $Nocns queue-limit $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $dc]0[expr $j]) $buffSize
173                     $Nocns queue-limit $r([expr $dc]0[expr $j]) $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $buffSize
174                     $Nocns duplex-link-op $r([expr $cl][expr $i][expr $j]) $r([expr $dc]0[expr $j]) queuePos 0.5
175                 }
176             }

```

```

177     }
178   }
179 }
180
181 #INTERNAL FLOWS
182
183 #Create a UDP agent and attach it to node s(0)
184 puts "Creating udp_(0) "
185 set udp_(0) [new Agent/UDP]
186 $udp_(0) set class_ 2
187 puts "Attaching r(820) udp_(0) "
188 $Nocns attach-agent $r(820) $udp_(0)
189 # Create a CBR traffic source and attach it to udp(0)
190 puts "Creating cbr(0) "
191 puts "Attaching cbr(0) udp(0) "
192 set cbr(0) [new Application/Traffic/CBR]
193 $cbr(0) set packetSize_ $cbrPacketSize
194 $cbr(0) set interval_ $cbrPacketInterval
195 $cbr(0) attach-agent $udp_(0)
196 puts "Creating sink_(0) "
197 set sink_(0) [new Agent/Null]
198 puts "Attaching r(802) sink_(0) "
199 $Nocns attach-agent $r(802) $sink_(0)
200 puts "Connecting udp(0) sink(0) "
201 $Nocns connect $udp_(0) $sink_(0)
202 puts "cbr(0) starting at 0 * 0.2962963"
203 $Nocns at 0.0 "$cbr(0) start"
204 $Nocns at 210.01 "$cbr(0) stop"
205
206 #Create a UDP agent and attach it to node s(1)
207 puts "Creating udp_(1) "
208 set udp_(1) [new Agent/UDP]
209 $udp_(1) set class_ 2
210 puts "Attaching r(322) udp_(1) "
211 $Nocns attach-agent $r(322) $udp_(1)
212 # Create a CBR traffic source and attach it to udp(1)
213 puts "Creating cbr(1) "
214 puts "Attaching cbr(1) udp(1) "
215 set cbr(1) [new Application/Traffic/CBR]
216 $cbr(1) set packetSize_ $cbrPacketSize
217 $cbr(1) set interval_ $cbrPacketInterval
218 $cbr(1) attach-agent $udp_(1)
219 puts "Creating sink_(1) "
220 set sink_(1) [new Agent/Null]
221 puts "Attaching r(300) sink_(1) "
222 $Nocns attach-agent $r(300) $sink_(1)
223 puts "Connecting udp(1) sink(1) "
224 $Nocns connect $udp_(1) $sink_(1)
225 puts "cbr(1) starting at 1 * 0.2962963"
226 $Nocns at 0.2962963 "$cbr(1) start"
227 $Nocns at 210.01 "$cbr(1) stop"
228
229 #Create a UDP agent and attach it to node s(2)
230 puts "Creating udp_(2) "
231 set udp_(2) [new Agent/UDP]
232 $udp_(2) set class_ 2
233 puts "Attaching r(320) udp_(2) "
234 $Nocns attach-agent $r(320) $udp_(2)
235 # Create a CBR traffic source and attach it to udp(2)
236 puts "Creating cbr(2) "
237 puts "Attaching cbr(2) udp(2) "
238 set cbr(2) [new Application/Traffic/CBR]
239 $cbr(2) set packetSize_ $cbrPacketSize
240 $cbr(2) set interval_ $cbrPacketInterval
241 $cbr(2) attach-agent $udp_(2)
242 puts "Creating sink_(2) "
243 set sink_(2) [new Agent/Null]
244 puts "Attaching r(302) sink_(2) "
245 $Nocns attach-agent $r(302) $sink_(2)
246 puts "Connecting udp(2) sink(2) "
247 $Nocns connect $udp_(2) $sink_(2)

```

```

248      puts "cbr(2) starting at 2 * 0.2962963"
249      $Nocns at 0.5925926 "$cbr(2) start"
250      $Nocns at 210.01 "$cbr(2) stop"
251
252      #Create a UDP agent and attach it to node s(3)
253      puts "Creating udp_(3)"
254      set udp_(3) [new Agent/UDP]
255      $udp_(3) set class_ 2
256      puts "Attaching r(002) udp_(3)"
257      $Nocns attach-agent $r(002) $udp_(3)
258      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(3)
259      puts "Creating cbr(3)"
260      puts "Attaching cbr(3) udp(3)"
261      set cbr(3) [new Application/Traffic/CBR]
262      $cbr(3) set packetSize_ $cbrPacketSize
263      $cbr(3) set interval_ $cbrPacketInterval
264      $cbr(3) attach-agent $udp_(3)
265      puts "Creating sink_(3)"
266      set sink_(3) [new Agent/Null]
267      puts "Attaching r(020) sink_(3)"
268      $Nocns attach-agent $r(020) $sink_(3)
269      puts "Connecting udp(3) sink(3)"
270      $Nocns connect $udp_(3) $sink_(3)
271      puts "cbr(3) starting at 3 * 0.2962963"
272      $Nocns at 0.8888889 "$cbr(3) start"
273      $Nocns at 210.01 "$cbr(3) stop"
274
275      #Create a UDP agent and attach it to node s(4)
276      puts "Creating udp_(4)"
277      set udp_(4) [new Agent/UDP]
278      $udp_(4) set class_ 2
279      puts "Attaching r(622) udp_(4)"
280      $Nocns attach-agent $r(622) $udp_(4)
281      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(4)
282      puts "Creating cbr(4)"
283      puts "Attaching cbr(4) udp(4)"
284      set cbr(4) [new Application/Traffic/CBR]
285      $cbr(4) set packetSize_ $cbrPacketSize
286      $cbr(4) set interval_ $cbrPacketInterval
287      $cbr(4) attach-agent $udp_(4)
288      puts "Creating sink_(4)"
289      set sink_(4) [new Agent/Null]
290      puts "Attaching r(600) sink_(4)"
291      $Nocns attach-agent $r(600) $sink_(4)
292      puts "Connecting udp(4) sink(4)"
293      $Nocns connect $udp_(4) $sink_(4)
294      puts "cbr(4) starting at 4 * 0.2962963"
295      $Nocns at 1.1851852 "$cbr(4) start"
296      $Nocns at 210.01 "$cbr(4) stop"
297
298      #Create a UDP agent and attach it to node s(5)
299      puts "Creating udp_(5)"
300      set udp_(5) [new Agent/UDP]
301      $udp_(5) set class_ 2
302      puts "Attaching r(800) udp_(5)"
303      $Nocns attach-agent $r(800) $udp_(5)
304      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(5)
305      puts "Creating cbr(5)"
306      puts "Attaching cbr(5) udp(5)"
307      set cbr(5) [new Application/Traffic/CBR]
308      $cbr(5) set packetSize_ $cbrPacketSize
309      $cbr(5) set interval_ $cbrPacketInterval
310      $cbr(5) attach-agent $udp_(5)
311      puts "Creating sink_(5)"
312      set sink_(5) [new Agent/Null]
313      puts "Attaching r(822) sink_(5)"
314      $Nocns attach-agent $r(822) $sink_(5)
315      puts "Connecting udp(5) sink(5)"
316      $Nocns connect $udp_(5) $sink_(5)
317      puts "cbr(5) starting at 5 * 0.2962963"
318      $Nocns at 1.4814816 "$cbr(5) start"

```

```

319      $Nocns at 210.01 "$cbr(5) stop"
320
321      #Create a UDP agent and attach it to node s(6)
322      puts "Creating udp_(6)"
323      set udp_(6) [new Agent/UDP]
324      $udp_(6) set class_ 2
325      puts "Attaching r(120) udp_(6)"
326      $Nocns attach-agent $r(120) $udp_(6)
327      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(6)
328      puts "Creating cbr(6)"
329      puts "Attaching cbr(6) udp(6)"
330      set cbr(6) [new Application/Traffic/CBR]
331      $cbr(6) set packetSize_ $cbrPacketSize
332      $cbr(6) set interval_ $cbrPacketInterval
333      $cbr(6) attach-agent $udp_(6)
334      puts "Creating sink_(6)"
335      set sink_(6) [new Agent/Null]
336      puts "Attaching r(102) sink_(6)"
337      $Nocns attach-agent $r(102) $sink_(6)
338      puts "Connecting udp(6) sink(6)"
339      $Nocns connect $udp_(6) $sink_(6)
340      puts "cbr(6) starting at 6 * 0.2962963"
341      $Nocns at 1.7777778 "$cbr(6) start"
342      $Nocns at 210.01 "$cbr(6) stop"
343
344      #Create a UDP agent and attach it to node s(7)
345      puts "Creating udp_(7)"
346      set udp_(7) [new Agent/UDP]
347      $udp_(7) set class_ 2
348      puts "Attaching r(202) udp_(7)"
349      $Nocns attach-agent $r(202) $udp_(7)
350      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(7)
351      puts "Creating cbr(7)"
352      puts "Attaching cbr(7) udp(7)"
353      set cbr(7) [new Application/Traffic/CBR]
354      $cbr(7) set packetSize_ $cbrPacketSize
355      $cbr(7) set interval_ $cbrPacketInterval
356      $cbr(7) attach-agent $udp_(7)
357      puts "Creating sink_(7)"
358      set sink_(7) [new Agent/Null]
359      puts "Attaching r(220) sink_(7)"
360      $Nocns attach-agent $r(220) $sink_(7)
361      puts "Connecting udp(7) sink(7)"
362      $Nocns connect $udp_(7) $sink_(7)
363      puts "cbr(7) starting at 7 * 0.2962963"
364      $Nocns at 2.074074 "$cbr(7) start"
365      $Nocns at 210.01 "$cbr(7) stop"
366
367      #Create a UDP agent and attach it to node s(8)
368      puts "Creating udp_(8)"
369      set udp_(8) [new Agent/UDP]
370      $udp_(8) set class_ 2
371      puts "Attaching r(200) udp_(8)"
372      $Nocns attach-agent $r(200) $udp_(8)
373      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(8)
374      puts "Creating cbr(8)"
375      puts "Attaching cbr(8) udp(8)"
376      set cbr(8) [new Application/Traffic/CBR]
377      $cbr(8) set packetSize_ $cbrPacketSize
378      $cbr(8) set interval_ $cbrPacketInterval
379      $cbr(8) attach-agent $udp_(8)
380      puts "Creating sink_(8)"
381      set sink_(8) [new Agent/Null]
382      puts "Attaching r(222) sink_(8)"
383      $Nocns attach-agent $r(222) $sink_(8)
384      puts "Connecting udp(8) sink(8)"
385      $Nocns connect $udp_(8) $sink_(8)
386      puts "cbr(8) starting at 8 * 0.2962963"
387      $Nocns at 2.3703704 "$cbr(8) start"
388      $Nocns at 210.01 "$cbr(8) stop"
389

```

```

390      #Create a UDP agent and attach it to node s(9)
391      puts "Creating udp_(9) "
392      set udp_(9) [new Agent/UDP]
393      $udp_(9) set class_ 2
394      puts "Attaching r(500) udp_(9) "
395      $Nocns attach-agent $r(500) $udp_(9)
396      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(9)
397      puts "Creating cbr(9) "
398      puts "Attaching cbr(9) udp(9) "
399      set cbr(9) [new Application/Traffic/CBR]
400      $cbr(9) set packetSize_ $cbrPacketSize
401      $cbr(9) set interval_ $cbrPacketInterval
402      $cbr(9) attach-agent $udp_(9)
403      puts "Creating sink_(9) "
404      set sink_(9) [new Agent/Null]
405      puts "Attaching r(522) sink_(9) "
406      $Nocns attach-agent $r(522) $sink_(9)
407      puts "Connecting udp(9) sink(9) "
408      $Nocns connect $udp_(9) $sink_(9)
409      puts "cbr(9) starting at 9 * 0.2962963"
410      $Nocns at 2.6666667 "$cbr(9) start"
411      $Nocns at 210.01 "$cbr(9) stop"
412
413      #Create a UDP agent and attach it to node s(10)
414      puts "Creating udp_(10) "
415      set udp_(10) [new Agent/UDP]
416      $udp_(10) set class_ 2
417      puts "Attaching r(520) udp_(10) "
418      $Nocns attach-agent $r(520) $udp_(10)
419      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(10)
420      puts "Creating cbr(10) "
421      puts "Attaching cbr(10) udp(10) "
422      set cbr(10) [new Application/Traffic/CBR]
423      $cbr(10) set packetSize_ $cbrPacketSize
424      $cbr(10) set interval_ $cbrPacketInterval
425      $cbr(10) attach-agent $udp_(10)
426      puts "Creating sink_(10) "
427      set sink_(10) [new Agent/Null]
428      puts "Attaching r(502) sink_(10) "
429      $Nocns attach-agent $r(502) $sink_(10)
430      puts "Connecting udp(10) sink(10) "
431      $Nocns connect $udp_(10) $sink_(10)
432      puts "cbr(10) starting at 10 * 0.2962963"
433      $Nocns at 2.962963 "$cbr(10) start"
434      $Nocns at 210.01 "$cbr(10) stop"
435
436      #Create a UDP agent and attach it to node s(11)
437      puts "Creating udp_(11) "
438      set udp_(11) [new Agent/UDP]
439      $udp_(11) set class_ 2
440      puts "Attaching r(602) udp_(11) "
441      $Nocns attach-agent $r(602) $udp_(11)
442      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(11)
443      puts "Creating cbr(11) "
444      puts "Attaching cbr(11) udp(11) "
445      set cbr(11) [new Application/Traffic/CBR]
446      $cbr(11) set packetSize_ $cbrPacketSize
447      $cbr(11) set interval_ $cbrPacketInterval
448      $cbr(11) attach-agent $udp_(11)
449      puts "Creating sink_(11) "
450      set sink_(11) [new Agent/Null]
451      puts "Attaching r(620) sink_(11) "
452      $Nocns attach-agent $r(620) $sink_(11)
453      puts "Connecting udp(11) sink(11) "
454      $Nocns connect $udp_(11) $sink_(11)
455      puts "cbr(11) starting at 11 * 0.2962963"
456      $Nocns at 3.2592592 "$cbr(11) start"
457      $Nocns at 210.01 "$cbr(11) stop"
458
459      #Create a UDP agent and attach it to node s(12)
460      puts "Creating udp_(12) "

```

```

461      set udp_(12) [new Agent/UDP]
462      $udp_(12) set class_ 2
463      puts "Attaching r(420) udp_(12) "
464      $Nocns attach-agent $r(420) $udp_(12)
465      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(12)
466      puts "Creating cbr(12) "
467      puts "Attaching cbr(12) udp(12) "
468      set cbr(12) [new Application/Traffic/CBR]
469      $cbr(12) set packetSize_ $cbrPacketSize
470      $cbr(12) set interval_ $cbrPacketInterval
471      $cbr(12) attach-agent $udp_(12)
472      puts "Creating sink_(12) "
473      set sink_(12) [new Agent/Null]
474      puts "Attaching r(402) sink_(12) "
475      $Nocns attach-agent $r(402) $sink_(12)
476      puts "Connecting udp(12) sink(12) "
477      $Nocns connect $udp_(12) $sink_(12)
478      puts "cbr(12) starting at 12 * 0.2962963"
479      $Nocns at 3.5555556 "$cbr(12) start"
480      $Nocns at 210.01 "$cbr(12) stop"
481
482      #Create a UDP agent and attach it to node s(13)
483      puts "Creating udp_(13) "
484      set udp_(13) [new Agent/UDP]
485      $udp_(13) set class_ 2
486      puts "Attaching r(000) udp_(13) "
487      $Nocns attach-agent $r(000) $udp_(13)
488      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(13)
489      puts "Creating cbr(13) "
490      puts "Attaching cbr(13) udp(13) "
491      set cbr(13) [new Application/Traffic/CBR]
492      $cbr(13) set packetSize_ $cbrPacketSize
493      $cbr(13) set interval_ $cbrPacketInterval
494      $cbr(13) attach-agent $udp_(13)
495      puts "Creating sink_(13) "
496      set sink_(13) [new Agent/Null]
497      puts "Attaching r(022) sink_(13) "
498      $Nocns attach-agent $r(022) $sink_(13)
499      puts "Connecting udp(13) sink(13) "
500      $Nocns connect $udp_(13) $sink_(13)
501      puts "cbr(13) starting at 13 * 0.2962963"
502      $Nocns at 3.851852 "$cbr(13) start"
503      $Nocns at 210.01 "$cbr(13) stop"
504
505      #Create a UDP agent and attach it to node s(14)
506      puts "Creating udp_(14) "
507      set udp_(14) [new Agent/UDP]
508      $udp_(14) set class_ 2
509      puts "Attaching r(100) udp_(14) "
510      $Nocns attach-agent $r(100) $udp_(14)
511      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(14)
512      puts "Creating cbr(14) "
513      puts "Attaching cbr(14) udp(14) "
514      set cbr(14) [new Application/Traffic/CBR]
515      $cbr(14) set packetSize_ $cbrPacketSize
516      $cbr(14) set interval_ $cbrPacketInterval
517      $cbr(14) attach-agent $udp_(14)
518      puts "Creating sink_(14) "
519      set sink_(14) [new Agent/Null]
520      puts "Attaching r(122) sink_(14) "
521      $Nocns attach-agent $r(122) $sink_(14)
522      puts "Connecting udp(14) sink(14) "
523      $Nocns connect $udp_(14) $sink_(14)
524      puts "cbr(14) starting at 14 * 0.2962963"
525      $Nocns at 4.148148 "$cbr(14) start"
526      $Nocns at 210.01 "$cbr(14) stop"
527
528      #Create a UDP agent and attach it to node s(15)
529      puts "Creating udp_(15) "
530      set udp_(15) [new Agent/UDP]
531      $udp_(15) set class_ 2

```

```

532      puts "Attaching r(702) udp_(15)"
533      $Nocns attach-agent $r(702) $udp_(15)
534      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(15)
535      puts "Creating cbr(15)"
536      puts "Attaching cbr(15) udp(15)"
537      set cbr(15) [new Application/Traffic/CBR]
538      $cbr(15) set packetSize_ $cbrPacketSize
539      $cbr(15) set interval_ $cbrPacketInterval
540      $cbr(15) attach-agent $udp_(15)
541      puts "Creating sink_(15)"
542      set sink_(15) [new Agent/Null]
543      puts "Attaching r(720) sink_(15)"
544      $Nocns attach-agent $r(720) $sink_(15)
545      puts "Connecting udp(15) sink(15)"
546      $Nocns connect $udp_(15) $sink_(15)
547      puts "cbr(15) starting at 15 * 0.2962963"
548      $Nocns at 4.4444447 "$cbr(15) start"
549      $Nocns at 210.01 "$cbr(15) stop"
550
551      #Create a UDP agent and attach it to node s(16)
552      puts "Creating udp_(16)"
553      set udp_(16) [new Agent/UDP]
554      $udp_(16) set class_ 2
555      puts "Attaching r(700) udp_(16)"
556      $Nocns attach-agent $r(700) $udp_(16)
557      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(16)
558      puts "Creating cbr(16)"
559      puts "Attaching cbr(16) udp(16)"
560      set cbr(16) [new Application/Traffic/CBR]
561      $cbr(16) set packetSize_ $cbrPacketSize
562      $cbr(16) set interval_ $cbrPacketInterval
563      $cbr(16) attach-agent $udp_(16)
564      puts "Creating sink_(16)"
565      set sink_(16) [new Agent/Null]
566      puts "Attaching r(722) sink_(16)"
567      $Nocns attach-agent $r(722) $sink_(16)
568      puts "Connecting udp(16) sink(16)"
569      $Nocns connect $udp_(16) $sink_(16)
570      puts "cbr(16) starting at 16 * 0.2962963"
571      $Nocns at 4.740741 "$cbr(16) start"
572      $Nocns at 210.01 "$cbr(16) stop"
573
574      #Create a UDP agent and attach it to node s(17)
575      puts "Creating udp_(17)"
576      set udp_(17) [new Agent/UDP]
577      $udp_(17) set class_ 2
578      puts "Attaching r(400) udp_(17)"
579      $Nocns attach-agent $r(400) $udp_(17)
580      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(17)
581      puts "Creating cbr(17)"
582      puts "Attaching cbr(17) udp(17)"
583      set cbr(17) [new Application/Traffic/CBR]
584      $cbr(17) set packetSize_ $cbrPacketSize
585      $cbr(17) set interval_ $cbrPacketInterval
586      $cbr(17) attach-agent $udp_(17)
587      puts "Creating sink_(17)"
588      set sink_(17) [new Agent/Null]
589      puts "Attaching r(422) sink_(17)"
590      $Nocns attach-agent $r(422) $sink_(17)
591      puts "Connecting udp(17) sink(17)"
592      $Nocns connect $udp_(17) $sink_(17)
593      puts "cbr(17) starting at 17 * 0.2962963"
594      $Nocns at 5.037037 "$cbr(17) start"
595      $Nocns at 210.01 "$cbr(17) stop"
596
597      #EXTERNAL FLOWS
598
599      #Create a UDP agent and attach it to node s(18)
600      puts "Creating udp_(18)"
601      set udp_(18) [new Agent/UDP]
602      $udp_(18) set class_ 2

```



```

603      puts "Attaching r(501) udp_(18)"
604      $Nocns attach-agent $r(501) $udp_(18)
605      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(18)
606      puts "Creating cbr(18)"
607      puts "Attaching cbr(18) udp(18)"
608      set cbr(18) [new Application/Traffic/CBR]
609      $cbr(18) set packetSize_ $cbrPacketSize
610      $cbr(18) set interval_ $cbrPacketInterval
611      $cbr(18) attach-agent $udp_(18)
612      puts "Creating sink_(18)"
613      set sink_(18) [new Agent/Null]
614      puts "Attaching r(321) sink_(18)"
615      $Nocns attach-agent $r(321) $sink_(18)
616      puts "Connecting udp(18) sink(18)"
617      $Nocns connect $udp_(18) $sink_(18)
618      puts "cbr(18) starting at 18 * 0.2962963"
619      $Nocns at 5.3333335 "$cbr(18) start"
620      $Nocns at 210.01 "$cbr(18) stop"
621
622      #Create a UDP agent and attach it to node s(19)
623      puts "Creating udp_(19)"
624      set udp_(19) [new Agent/UDP]
625      $udp_(19) set class_ 2
626      puts "Attaching r(801) udp_(19)"
627      $Nocns attach-agent $r(801) $udp_(19)
628      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(19)
629      puts "Creating cbr(19)"
630      puts "Attaching cbr(19) udp(19)"
631      set cbr(19) [new Application/Traffic/CBR]
632      $cbr(19) set packetSize_ $cbrPacketSize
633      $cbr(19) set interval_ $cbrPacketInterval
634      $cbr(19) attach-agent $udp_(19)
635      puts "Creating sink_(19)"
636      set sink_(19) [new Agent/Null]
637      puts "Attaching r(310) sink_(19)"
638      $Nocns attach-agent $r(310) $sink_(19)
639      puts "Connecting udp(19) sink(19)"
640      $Nocns connect $udp_(19) $sink_(19)
641      puts "cbr(19) starting at 19 * 0.2962963"
642      $Nocns at 5.6296296 "$cbr(19) start"
643      $Nocns at 210.01 "$cbr(19) stop"
644
645      #Create a UDP agent and attach it to node s(20)
646      puts "Creating udp_(20)"
647      set udp_(20) [new Agent/UDP]
648      $udp_(20) set class_ 2
649      puts "Attaching r(012) udp_(20)"
650      $Nocns attach-agent $r(012) $udp_(20)
651      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(20)
652      puts "Creating cbr(20)"
653      puts "Attaching cbr(20) udp(20)"
654      set cbr(20) [new Application/Traffic/CBR]
655      $cbr(20) set packetSize_ $cbrPacketSize
656      $cbr(20) set interval_ $cbrPacketInterval
657      $cbr(20) attach-agent $udp_(20)
658      puts "Creating sink_(20)"
659      set sink_(20) [new Agent/Null]
660      puts "Attaching r(712) sink_(20)"
661      $Nocns attach-agent $r(712) $sink_(20)
662      puts "Connecting udp(20) sink(20)"
663      $Nocns connect $udp_(20) $sink_(20)
664      puts "cbr(20) starting at 20 * 0.2962963"
665      $Nocns at 5.925926 "$cbr(20) start"
666      $Nocns at 210.01 "$cbr(20) stop"
667
668      #Create a UDP agent and attach it to node s(21)
669      puts "Creating udp_(21)"
670      set udp_(21) [new Agent/UDP]
671      $udp_(21) set class_ 2
672      puts "Attaching r(010) udp_(21)"
673      $Nocns attach-agent $r(010) $udp_(21)

```

```

674      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(21)
675      puts "Creating cbr(21)"
676      puts "Attaching cbr(21) udp(21)"
677      set cbr(21) [new Application/Traffic/CBR]
678      $cbr(21) set packetSize_ $cbrPacketSize
679      $cbr(21) set interval_ $cbrPacketInterval
680      $cbr(21) attach-agent $udp_(21)
681      puts "Creating sink_(21)"
682      set sink_(21) [new Agent/Null]
683      puts "Attaching r(212) sink_(21)"
684      $Nocns attach-agent $r(212) $sink_(21)
685      puts "Connecting udp(21) sink(21)"
686      $Nocns connect $udp_(21) $sink_(21)
687      puts "cbr(21) starting at 21 * 0.2962963"
688      $Nocns at 6.2222223 "$cbr(21) start"
689      $Nocns at 210.01 "$cbr(21) stop"
690
691      #Create a UDP agent and attach it to node s(22)
692      puts "Creating udp_(22)"
693      set udp_(22) [new Agent/UDP]
694      $udp_(22) set class_ 2
695      puts "Attaching r(621) udp_(22)"
696      $Nocns attach-agent $r(621) $udp_(22)
697      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(22)
698      puts "Creating cbr(22)"
699      puts "Attaching cbr(22) udp(22)"
700      set cbr(22) [new Application/Traffic/CBR]
701      $cbr(22) set packetSize_ $cbrPacketSize
702      $cbr(22) set interval_ $cbrPacketInterval
703      $cbr(22) attach-agent $udp_(22)
704      puts "Creating sink_(22)"
705      set sink_(22) [new Agent/Null]
706      puts "Attaching r(810) sink_(22)"
707      $Nocns attach-agent $r(810) $sink_(22)
708      puts "Connecting udp(22) sink(22)"
709      $Nocns connect $udp_(22) $sink_(22)
710      puts "cbr(22) starting at 22 * 0.2962963"
711      $Nocns at 6.5185184 "$cbr(22) start"
712      $Nocns at 210.01 "$cbr(22) stop"
713
714      #Create a UDP agent and attach it to node s(23)
715      puts "Creating udp_(23)"
716      set udp_(23) [new Agent/UDP]
717      $udp_(23) set class_ 2
718      puts "Attaching r(021) udp_(23)"
719      $Nocns attach-agent $r(021) $udp_(23)
720      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(23)
721      puts "Creating cbr(23)"
722      puts "Attaching cbr(23) udp(23)"
723      set cbr(23) [new Application/Traffic/CBR]
724      $cbr(23) set packetSize_ $cbrPacketSize
725      $cbr(23) set interval_ $cbrPacketInterval
726      $cbr(23) attach-agent $udp_(23)
727      puts "Creating sink_(23)"
728      set sink_(23) [new Agent/Null]
729      puts "Attaching r(601) sink_(23)"
730      $Nocns attach-agent $r(601) $sink_(23)
731      puts "Connecting udp(23) sink(23)"
732      $Nocns connect $udp_(23) $sink_(23)
733      puts "cbr(23) starting at 23 * 0.2962963"
734      $Nocns at 6.814815 "$cbr(23) start"
735      $Nocns at 210.01 "$cbr(23) stop"
736
737      #Create a UDP agent and attach it to node s(24)
738      puts "Creating udp_(24)"
739      set udp_(24) [new Agent/UDP]
740      $udp_(24) set class_ 2
741      puts "Attaching r(001) udp_(24)"
742      $Nocns attach-agent $r(001) $udp_(24)
743      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(24)
744      puts "Creating cbr(24)"

```

```

745      puts "Attaching cbr(24) udp(24)"
746      set cbr(24) [new Application/Traffic/CBR]
747      $cbr(24) set packetSize_ $cbrPacketSize
748      $cbr(24) set interval_ $cbrPacketInterval
749      $cbr(24) attach-agent $udp_(24)
750      puts "Creating sink_(24)"
751      set sink_(24) [new Agent/Null]
752      puts "Attaching r(710) sink_(24)"
753      $Nocns attach-agent $r(710) $sink_(24)
754      puts "Connecting udp(24) sink(24)"
755      $Nocns connect $udp_(24) $sink_(24)
756      puts "cbr(24) starting at 24 * 0.2962963"
757      $Nocns at 7.111111 "$cbr(24) start"
758      $Nocns at 210.01 "$cbr(24) stop"
759
760      #Create a UDP agent and attach it to node s(25)
761      puts "Creating udp_(25)"
762      set udp_(25) [new Agent/UDP]
763      $udp_(25) set class_ 2
764      puts "Attaching r(221) udp_(25)"
765      $Nocns attach-agent $r(221) $udp_(25)
766      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(25)
767      puts "Creating cbr(25)"
768      puts "Attaching cbr(25) udp(25)"
769      set cbr(25) [new Application/Traffic/CBR]
770      $cbr(25) set packetSize_ $cbrPacketSize
771      $cbr(25) set interval_ $cbrPacketInterval
772      $cbr(25) attach-agent $udp_(25)
773      puts "Creating sink_(25)"
774      set sink_(25) [new Agent/Null]
775      puts "Attaching r(612) sink_(25)"
776      $Nocns attach-agent $r(612) $sink_(25)
777      puts "Connecting udp(25) sink(25)"
778      $Nocns connect $udp_(25) $sink_(25)
779      puts "cbr(25) starting at 25 * 0.2962963"
780      $Nocns at 7.4074073 "$cbr(25) start"
781      $Nocns at 210.01 "$cbr(25) stop"
782
783      #Create a UDP agent and attach it to node s(26)
784      puts "Creating udp_(26)"
785      set udp_(26) [new Agent/UDP]
786      $udp_(26) set class_ 2
787      puts "Attaching r(210) udp_(26)"
788      $Nocns attach-agent $r(210) $udp_(26)
789      # Create a CBR traffic source and attach it to udp(26)
790      puts "Creating cbr(26)"
791      puts "Attaching cbr(26) udp(26)"
792      set cbr(26) [new Application/Traffic/CBR]
793      $cbr(26) set packetSize_ $cbrPacketSize
794      $cbr(26) set interval_ $cbrPacketInterval
795      $cbr(26) attach-agent $udp_(26)
796      puts "Creating sink_(26)"
797      set sink_(26) [new Agent/Null]
798      puts "Attaching r(301) sink_(26)"
799      $Nocns attach-agent $r(301) $sink_(26)
800      puts "Connecting udp(26) sink(26)"
801      $Nocns connect $udp_(26) $sink_(26)
802      puts "cbr(26) starting at 26 * 0.2962963"
803      $Nocns at 7.703704 "$cbr(26) start"
804      $Nocns at 210.01 "$cbr(26) stop"
805      #####
806      #
807      # Tell nodes when the simulation ends
808      #
809      for {set i 0} {$i < $nc} {incr i} {
810          for {set j 0} {$j < $x} {incr j} {
811              for {set k 0} {$k < $x} {incr k} {
812                  $Nocns at 210.01 "$r([expr $i][expr $j][expr $k]) reset"
813              }
814          }
815      }

```

```

816 $Nocns rtproto Static ;# Static routing strategy
817 $Nocns at 210.02 "stop"
818 $Nocns at 210.03 "puts \"NS EXITING...\" ; $Nocns halt"
819 proc stop {} {
820     global Nocns tracefd namtrace
821     $Nocns flush-trace
822     close $tracefd
823     close $namtrace ;# Close the NAM trace file
824     # Print some info.
825     puts "Run nam..."
826     # exec nam simulacaoComFio.nam
827 }
828
829 #wired nodes to be turned off
830 $Nocns rtmodel-at 50.0 down $r(011) $r(311)
831 $Nocns rtmodel-at 80.0 up $r(011) $r(311)
832 $Nocns rtmodel-at 50.0 down $r(011) $r(411)
833 $Nocns rtmodel-at 80.0 up $r(011) $r(411)
834 $Nocns rtmodel-at 50.0 down $r(011) $r(111)
835 $Nocns rtmodel-at 80.0 up $r(011) $r(111)
836
837 #wired nodes to be turned off
838 $Nocns rtmodel-at 40.0 down $r(111) $r(411)
839 $Nocns rtmodel-at 90.0 up $r(111) $r(411)
840 $Nocns rtmodel-at 40.0 down $r(111) $r(311)
841 $Nocns rtmodel-at 90.0 up $r(111) $r(311)
842 $Nocns rtmodel-at 40.0 down $r(111) $r(511)
843 $Nocns rtmodel-at 90.0 up $r(111) $r(511)
844 $Nocns rtmodel-at 40.0 down $r(111) $r(011)
845 $Nocns rtmodel-at 90.0 up $r(111) $r(011)
846 $Nocns rtmodel-at 40.0 down $r(111) $r(211)
847 $Nocns rtmodel-at 90.0 up $r(111) $r(211)
848
849 #run the simulation
850 $Nocns run

```

APÊNDICE B – EXEMPLO DE SCRIPT DE SIMULAÇÃO SEM FIO

Trecho de Código B.1: script TCL de uma simulação sem fio gerado automaticamente pela plataforma de simulação do capítulo 4. Neste caso trata-se da primeira simulação sem fio amostrada a partir dos resultados da simulação com fio cujo script está no apêndice A

```

1 # Initializing
2 set ns_ [new Simulator]
3
4 #topology parameters
5 set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;#Channel Type
6 set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
7 set opt(netif) Phy/WirelessPhy ;# network interface type
8 set opt(mac) Mac/802_11 ;# MAC type
9 set opt(ifq) CMUPriQueue
10 set opt(ll) LL ;# link layer type
11 set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;# antenna model
12 set opt(ifqlen) 64 ;# max packet in ifq
13 set opt(nc) 9 ;# number of mobilenodes
14 set opt(nn) 27 ;# totalOfNodes
15 set rad [expr int( sqrt( $opt(nc) ) ) ]
16 set farAwayDistConstant 10
17 set farAwaySpeedConstant 1000
18 set initial_x 1
19 set initial_y 1
20 set pos_x $initial_x
21 set pos_y $initial_y
22
23 set PI [expr atan(1) * 4]
24 #Area
25 set distNodes 170
26 set closeAdjacentNodes 10
27 set opt(x) [expr $distNodes * $rad + $initial_x]
28 set opt(y) [expr $distNodes * $rad + $initial_y]
29 set opt(stop) 15.0 ;# simulation time
30 set opt(tr) simulacaoSemFio0 ;# trace file
31
32 #protocol
33 set opt(rp) DSR
34
35 set tracefd [open $opt(tr).tr w]
36 $ns_ trace-all $tracefd
37
38 set namtrace [open $opt(tr).nam w]
39 $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)
40
41 set farXOffset [ expr $opt(nc) * $farAwayDistConstant * $distNodes + $initial_x]
42 set farYOffset [ expr $opt(nc) * $farAwayDistConstant * $distNodes + $initial_y]
43 set farSpeed [ expr $opt(nc) * $farAwaySpeedConstant ]

```

```

44 # set up topography object
45 set topo [new Topography]
46
47 $topo load_flatgrid [ expr $opt(x) + $farXOffset + 2 * $closeAdjacentNodes ] [ expr $opt(y) + $farYOffset + 2
    * $closeAdjacentNodes ]
48
49 # Create God
50 set god_ [create-god $opt(nn)]
51
52 # configure node, please note the change below.
53 $ns_ node-config -adhocRouting $opt(rp) \
54     -llType $opt(ll) \
55     -macType $opt(mac) \
56     -ifqType $opt(ifq) \
57     -ifqLen $opt(ifqlen) \
58     -antType $opt(ant) \
59     -propType $opt(prop) \
60     -phyType $opt(netif) \
61     -topoInstance $topo \
62     -agentTrace ON \
63     -routerTrace ON \
64     -macTrace ON \
65     -movementTrace ON \
66     -channel [new $opt(chan)]
67
68 # configure offset for distant inactive nodes
69 for (set i 0) {$i < $opt(nn)} {incr i} {
70     set node_($i) [$ns_ node]
71 }
72
73 # unique flow 0 : 7 0 3 55
74 # unique flow 1 : 1 0 7 66
75 # unique flow 2 : 3 0 2 23
76 # unique flow 3 : 5 0 7 68
77
78 set totalAdjacentNodes_(0) 4
79 # this node follows normally in this slot
80 set turnOffFlag_(0) 0
81 set turnOnFlag_(0) 0
82 set initialOffTime_(0) 0
83 set endOffTime_(0) 0
84 # unique flow 0 : 21 1 3 28
85
86 set totalAdjacentNodes_(1) 1
87 # this node follows normally in this slot
88 set turnOffFlag_(1) 0
89 set turnOnFlag_(1) 0
90 set initialOffTime_(1) 0
91 set endOffTime_(1) 0
92 # unique flow 0 : 3 0 2 23
93 # unique flow 1 : 25 2 6 59
94
95 set totalAdjacentNodes_(2) 2
96 # this node follows normally in this slot
97 set turnOffFlag_(2) 0
98 set turnOnFlag_(2) 0
99 set initialOffTime_(2) 0
100 set endOffTime_(2) 0
101 # unique flow 0 : 7 0 3 55
102 # unique flow 1 : 73 8 3 30
103 # unique flow 2 : 46 5 3 34
104 # unique flow 3 : 21 1 3 28
105
106 set totalAdjacentNodes_(3) 4
107 # this node follows normally in this slot
108 set turnOffFlag_(3) 0
109 set turnOnFlag_(3) 0
110 set initialOffTime_(3) 0
111 set endOffTime_(3) 0
112
113 set totalAdjacentNodes_(4) 0

```

```

114 # this node follows normally in this slot
115 set turnOffFlag_(4) 0
116 set turnOnFlag_(4) 0
117 set initialOffTime_(4) 0
118 set endOffTime_(4) 0
119 # unique flow 0 : 46 5 3 34
120
121 set totalAdjacentNodes_(5) 1
122 # this node follows normally in this slot
123 set turnOffFlag_(5) 0
124 set turnOnFlag_(5) 0
125 set initialOffTime_(5) 0
126 set endOffTime_(5) 0
127 # unique flow 0 : 25 2 6 59
128 # unique flow 1 : 61 6 7 75
129
130 set totalAdjacentNodes_(6) 2
131 # this node follows normally in this slot
132 set turnOffFlag_(6) 0
133 set turnOnFlag_(6) 0
134 set initialOffTime_(6) 0
135 set endOffTime_(6) 0
136 # unique flow 0 : 1 0 7 66
137 # unique flow 1 : 5 0 7 68
138 # unique flow 2 : 61 6 7 75
139
140 set totalAdjacentNodes_(7) 3
141 # this node follows normally in this slot
142 set turnOffFlag_(7) 0
143 set turnOnFlag_(7) 0
144 set initialOffTime_(7) 0
145 set endOffTime_(7) 0
146 # unique flow 0 : 73 8 3 30
147
148 set totalAdjacentNodes_(8) 1
149 # this node follows normally in this slot
150 set turnOffFlag_(8) 0
151 set turnOnFlag_(8) 0
152 set initialOffTime_(8) 0
153 set endOffTime_(8) 0
154
155
156 puts "adjusting node initial position"
157 set adjcentNodeAsoluteCount $opt(nc)
158 for (set i 0) { $i < $opt(nc) } { incr i } {
159
160     if { $i == 0 } {
161         set pos_x $initial_x
162         set pos_y [expr $rad * $distNodes + $initial_y]
163     } elseif { $i % $rad == 0 } {
164         set pos_x $initial_x
165         set pos_y [expr $pos_y - $distNodes]
166     } else {
167         set pos_x [expr $pos_x + $distNodes]
168     }
169     puts "node $i: ($pos_x, $pos_y)"
170     if { $turnOffFlag_($i) != 2 && $turnOnFlag_($i) != 1 } {
171         $node_($i) set X_ $pos_x
172         $node_($i) set Y_ $pos_y
173         $node_($i) set Z_ 0
174     } else {
175         #put inactive nodes far away
176         $node_($i) set X_ [ expr $pos_x + $farXOffset ]
177         $node_($i) set Y_ [ expr $pos_y + $farYOffset ]
178         $node_($i) set Z_ 0
179     }
180     if { $turnOffFlag_($i) == 1 } {
181         $ns_ at $initialOffTime_($i) "$node_($i) setdest [ expr $pos_x + $farXOffset ] [ expr $pos_y +
            $farYOffset ] $farSpeed"
182     }
183     if { $turnOnFlag_($i) == 1 } {

```

```

184         $ns_ at $sendOffTime_($i) "$node_($i) setdest $pos_x $pos_y $farSpeed"
185     }
186     if { $totalAdjacentNodes_($i) > 0 } {
187         puts "adjusting node $i adjacent source and destination nodes initial positions"
188         set angle [ expr 2 * $PI / $totalAdjacentNodes_($i) ]
189         for {set j 0} { $j < $totalAdjacentNodes_($i) } {incr j} {
190             #clockwise fulfilling
191             set pos_a_x [ expr $pos_x - $closeAdjacentNodes * cos($j * $angle) ]
192             set pos_a_y [ expr $pos_y + $closeAdjacentNodes * sin($j * $angle) ]
193             if { $turnOffFlag_($i) != 2 && $turnOnFlag_($i) != 1 } {
194                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set X_ $pos_a_x
195                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set Y_ $pos_a_y
196                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set Z_ 0
197             } else {
198                 #put inactive nodes far away
199                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set X_ [ expr $pos_a_x + $farXOffset ]
200                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set Y_ [ expr $pos_a_y + $farYOffset ]
201                 $node_($adjcentNodeAsoluteCount) set Z_ 0
202             }
203             if { $turnOffFlag_($i) == 1 } {
204                 $ns_ at $initialOffTime_($i) "$node_($adjcentNodeCount) setdest [ expr $pos_a_x + $farXOffset
205                     ] [ expr $pos_a_y + $farYOffset ] $farSpeed"
206             }
207             if { $turnOnFlag_($i) == 1 } {
208                 $ns_ at $sendOffTime_($i) "$node_($adjcentNodeCount) setdest $pos_a_x $pos_a_y $farSpeed"
209             }
210             puts "node $adjcentNodeAsoluteCount: ($pos_a_x, $pos_a_y)"
211             incr adjcentNodeAsoluteCount
212         }
213     }
214     #ns2 node screen size
215     for {set i 0} { $i < $opt(nn) } {incr i} {
216         $ns_ initial_node_pos $node_($i) 30
217     }
218
219     #source node
220     #creating udp agent
221     #source wireless: 0 destination Wireless: 3
222     puts "creating udp(0)"
223
224     set udp_(0) [new Agent/UDP]
225     $udp_(0) set class_ 2
226
227     $ns_ attach-agent $node_(9) $udp_(0)
228
229     puts "traffic cbr(0)"
230
231     set cbr(0) [new Application/Traffic/CBR]
232
233     #cbr parameters
234     $cbr(0) set packetSize_ 512
235     $cbr(0) set interval_ 0.2
236
237     puts "linking cbr to the udp source"
238     $cbr(0) attach-agent $udp_(0)
239
240     puts "creating sink agent sink(0)"
241     #destination node
242     set sink_(0) [new Agent/Null]
243
244     puts "setting sink agent to the destintion node- node_(16) sink(0)"
245     $ns_ attach-agent $node_(16) $sink_(0)
246
247     puts "Connecting udp(0) sink(0)"
248     $ns_ connect $udp_(0) $sink_(0)
249
250     set nrand_c [ expr rand() ]
251     puts "cbr(0) iniciando em 0 * 0.8888889 "
252     $ns_ at 0.0 "$cbr(0) start"
253     $ns_ at 15.0 "$cbr(0) stop"

```



```

254
255 #source node
256 #creating udp agent
257 #source wireless: 8 destination Wireless: 3
258 puts "creating udp(1) "
259
260 set udp_1 [new Agent/UDP]
261 $udp_1 set class_ 2
262
263 $ns_ attach-agent $node_(26) $udp_1
264
265 puts "traffic cbr(1)"
266
267 set cbr(1) [new Application/Traffic/CBR]
268
269 #cbr parameters
270 $cbr(1) set packetSize_ 512
271 $cbr(1) set interval_ 0.2
272
273 puts "linking cbr to the udp source"
274 $cbr(1) attach-agent $udp_1
275
276 puts "creating sink agent sink(1) "
277 #destination node
278 set sink_(1) [new Agent/Null]
279
280 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(17) sink(1) "
281 $ns_ attach-agent $node_(17) $sink_(1)
282
283 puts "Connecting udp(1) sink(1) "
284 $ns_ connect $udp_1 $sink_(1)
285
286 set nrand_c [ expr rand() ]
287 puts "cbr(1) iniciando em 1 * 0.8888889 "
288 $ns_ at 0.8888889 "$cbr(1) start"
289 $ns_ at 15.0 "$cbr(1) stop"
290
291 #source node
292 #creating udp agent
293 #source wireless: 5 destination Wireless: 3
294 puts "creating udp(2) "
295
296 set udp_(2) [new Agent/UDP]
297 $udp_(2) set class_ 2
298
299 $ns_ attach-agent $node_(20) $udp_(2)
300
301 puts "traffic cbr(2) "
302
303 set cbr(2) [new Application/Traffic/CBR]
304
305 #cbr parameters
306 $cbr(2) set packetSize_ 512
307 $cbr(2) set interval_ 0.2
308
309 puts "linking cbr to the udp source"
310 $cbr(2) attach-agent $udp_(2)
311
312 puts "creating sink agent sink(2) "
313 #destination node
314 set sink_(2) [new Agent/Null]
315
316 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(18) sink(2) "
317 $ns_ attach-agent $node_(18) $sink_(2)
318
319 puts "Connecting udp(2) sink(2) "
320 $ns_ connect $udp_(2) $sink_(2)
321
322 set nrand_c [ expr rand() ]
323 puts "cbr(2) iniciando em 2 * 0.8888889 "
324 $ns_ at 1.7777778 "$cbr(2) start"

```

```

325 $ns_ at 15.0 "$cbr(2) stop"
326
327 #source node
328 #creating udp agent
329 #source wireless: 0 destination Wireless: 7
330 puts "creating udp(3) "
331
332 set udp_(3) [new Agent/UDP]
333 $udp_(3) set class_ 2
334
335 $ns_ attach-agent $node_(10) $udp_(3)
336
337 puts "traffic cbr(3) "
338
339 set cbr(3) [new Application/Traffic/CBR]
340
341 #cbr parameters
342 $cbr(3) set packetSize_ 512
343 $cbr(3) set interval_ 0.2
344
345 puts "linking cbr to the udp source"
346 $cbr(3) attach-agent $udp_(3)
347
348 puts "creating sink agent sink(3) "
349 #destination node
350 set sink_(3) [new Agent/Null]
351
352 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(23) sink(3) "
353 $ns_ attach-agent $node_(23) $sink_(3)
354
355 puts "Connecting udp(3) sink(3) "
356 $ns_ connect $udp_(3) $sink_(3)
357
358 set nrand_c [ expr rand() ]
359 puts "cbr(3) iniciando em 3 * 0.8888889 "
360 $ns_ at 2.6666667 "$cbr(3) start"
361 $ns_ at 15.0 "$cbr(3) stop"
362
363 #source node
364 #creating udp agent
365 #source wireless: 0 destination Wireless: 2
366 puts "creating udp(4) "
367
368 set udp_(4) [new Agent/UDP]
369 $udp_(4) set class_ 2
370
371 $ns_ attach-agent $node_(11) $udp_(4)
372
373 puts "traffic cbr(4) "
374
375 set cbr(4) [new Application/Traffic/CBR]
376
377 #cbr parameters
378 $cbr(4) set packetSize_ 512
379 $cbr(4) set interval_ 0.2
380
381 puts "linking cbr to the udp source"
382 $cbr(4) attach-agent $udp_(4)
383
384 puts "creating sink agent sink(4) "
385 #destination node
386 set sink_(4) [new Agent/Null]
387
388 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(14) sink(4) "
389 $ns_ attach-agent $node_(14) $sink_(4)
390
391 puts "Connecting udp(4) sink(4) "
392 $ns_ connect $udp_(4) $sink_(4)
393
394 set nrand_c [ expr rand() ]
395 puts "cbr(4) iniciando em 4 * 0.8888889 "

```

```

396 $ns_ at 3.5555556 "$cbr(4) start"
397 $ns_ at 15.0 "$cbr(4) stop"
398
399 #source node
400 #creating udp agent
401 #source wireless: 2 destination Wireless: 6
402 puts "creating udp(5) "
403
404 set udp_(5) [new Agent/UDP]
405 $udp_(5) set class_ 2
406
407 $ns_ attach-agent $node_(15) $udp_(5)
408
409 puts "traffic cbr(5) "
410
411 set cbr(5) [new Application/Traffic/CBR]
412
413 #cbr parameters
414 $cbr(5) set packetSize_ 512
415 $cbr(5) set interval_ 0.2
416
417 puts "linking cbr to the udp source"
418 $cbr(5) attach-agent $udp_(5)
419
420 puts "creating sink agent sink(5) "
421 #destination node
422 set sink_(5) [new Agent/Null]
423
424 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(21) sink(5) "
425 $ns_ attach-agent $node_(21) $sink_(5)
426
427 puts "Connecting udp(5) sink(5) "
428 $ns_ connect $udp_(5) $sink_(5)
429
430 set nrand_c [ expr rand() ]
431 puts "cbr(5) iniciando em 5 * 0.8888889 "
432 $ns_ at 4.4444447 "$cbr(5) start"
433 $ns_ at 15.0 "$cbr(5) stop"
434
435 #source node
436 #creating udp agent
437 #source wireless: 0 destination Wireless: 7
438 puts "creating udp(6) "
439
440 set udp_(6) [new Agent/UDP]
441 $udp_(6) set class_ 2
442
443 $ns_ attach-agent $node_(12) $udp_(6)
444
445 puts "traffic cbr(6) "
446
447 set cbr(6) [new Application/Traffic/CBR]
448
449 #cbr parameters
450 $cbr(6) set packetSize_ 512
451 $cbr(6) set interval_ 0.2
452
453 puts "linking cbr to the udp source"
454 $cbr(6) attach-agent $udp_(6)
455
456 puts "creating sink agent sink(6) "
457 #destination node
458 set sink_(6) [new Agent/Null]
459
460 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(24) sink(6) "
461 $ns_ attach-agent $node_(24) $sink_(6)
462
463 puts "Connecting udp(6) sink(6) "
464 $ns_ connect $udp_(6) $sink_(6)
465
466 set nrand_c [ expr rand() ]

```

```

467 puts "cbr(6) iniciando em 6 * 0.8888889 "
468 $ns_ at 5.3333335 "$cbr(6) start"
469 $ns_ at 15.0 "$cbr(6) stop"
470
471 #source node
472 #creating udp agent
473 #source wireless: 1 destination Wireless: 3
474 puts "creating udp(7)"
475
476 set udp_(7) [new Agent/UDP]
477 $udp_(7) set class_ 2
478
479 $ns_ attach-agent $node_(13) $udp_(7)
480
481 puts "traffic cbr(7)"
482
483 set cbr(7) [new Application/Traffic/CBR]
484
485 #cbr parameters
486 $cbr(7) set packetSize_ 512
487 $cbr(7) set interval_ 0.2
488
489 puts "linking cbr to the udp source"
490 $cbr(7) attach-agent $udp_(7)
491
492 puts "creating sink agent sink(7)"
493 #destination node
494 set sink_(7) [new Agent/Null]
495
496 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(19) sink(7)"
497 $ns_ attach-agent $node_(19) $sink_(7)
498
499 puts "Connecting udp(7) sink(7)"
500 $ns_ connect $udp_(7) $sink_(7)
501
502 set nrand_c [ expr rand() ]
503 puts "cbr(7) iniciando em 7 * 0.8888889 "
504 $ns_ at 6.2222223 "$cbr(7) start"
505 $ns_ at 15.0 "$cbr(7) stop"
506
507 #source node
508 #creating udp agent
509 #source wireless: 6 destination Wireless: 7
510 puts "creating udp(8)"
511
512 set udp_(8) [new Agent/UDP]
513 $udp_(8) set class_ 2
514
515 $ns_ attach-agent $node_(22) $udp_(8)
516
517 puts "traffic cbr(8)"
518
519 set cbr(8) [new Application/Traffic/CBR]
520
521 #cbr parameters
522 $cbr(8) set packetSize_ 512
523 $cbr(8) set interval_ 0.2
524
525 puts "linking cbr to the udp source"
526 $cbr(8) attach-agent $udp_(8)
527
528 puts "creating sink agent sink(8)"
529 #destination node
530 set sink_(8) [new Agent/Null]
531
532 puts "setting sink agent to the destintion node- node_(25) sink(8)"
533 $ns_ attach-agent $node_(25) $sink_(8)
534
535 puts "Connecting udp(8) sink(8)"
536 $ns_ connect $udp_(8) $sink_(8)
537

```

```
538 set nrand_c [ expr rand() ]
539 puts "cbr(8) iniciando em 8 * 0.8888889 "
540 $ns_ at 7.111111 "$cbr(8) start"
541 $ns_ at 15.0 "$cbr(8) stop"
542
543 #
544 # finishing simulation
545 #
546 for {set i 0} {$i < $opt(nn) } {incr i} {
547     $ns_ at $opt(stop).01 "$node_($i) reset"
548 }
549 # stopping nam animation
550 $ns_ at $opt(stop).01 "$ns_ nam-end-wireless $opt(stop)"
551 $ns_ at $opt(stop).01 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
552 proc stop {} {
553     global ns_ tracefd
554     $ns_ flush-trace
555     close $tracefd
556 }
557 puts "Starting Simulation..."
558 $ns_ run
```

APÊNDICE C – EXEMPLO PARA OS PARÂMETROS DE ENTRADA

Este apêndice ilustra um exemplo de parâmetros de entrada da plataforma de simulação descrita no capítulo 4 especificando dois experimentos. No primeiro há o desligamento de dois nós em intervalos de tempos distintos empregando o protocolo DSR ao passo que no segundo há a simulação de uma topologia empregando o protocolo AODV.

Trecho de Código C.1: exemplo de parâmetros de entrada da ferramenta de simulação

```

1  <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2  <simulationSchema>
3    <simulationProfile>
4      <wirelessProtocol>DSR</wirelessProtocol>
5      <numberOfNodesInCluster>9</numberOfNodesInCluster>
6      <numberOfClusters>9</numberOfClusters>
7      <internalTraffic>0.1</internalTraffic>
8      <internalTrafficDesirableHopNumber>16</internalTrafficDesirableHopNumber>
9      <externalTraffic>0.9</externalTraffic>
10     <externalTrafficDesirableHopNumber>16</externalTrafficDesirableHopNumber>
11     <packetSize>512</packetSize>
12     <timeInterval>5.0</timeInterval>
13     <appThroughput>5.0</appThroughput>
14     <wiredBandwidth>0.25Mb</wiredBandwidth>
15     <linkDelay>0.1ms</linkDelay>
16     <wiredQueueSize>2</wiredQueueSize>
17     <wiredFileDiscriminator>simulacaoComFio</wiredFileDiscriminator>
18     <initialTime>0</initialTime>
19     <endTime>200</endTime>
20     <wirelessQueueSize>64</wirelessQueueSize>
21     <wirelessFileDiscriminator>simulacaoSemFio</wirelessFileDiscriminator>
22     <maxRelDifDeliveryRate>0.04</maxRelDifDeliveryRate>
23     <maxRelDifMeanDelay>0.05</maxRelDifMeanDelay>
24     <simulationApproach>ONLY_THROUGHPUT</simulationApproach>
25     <turnOffNode>
26       <nodeIndex>0</nodeIndex>
27       <initialOffTime>50</initialOffTime>
28       <endOffTime>80</endOffTime>
29     </turnOffNode>
30     <turnOffNode>
31       <nodeIndex>1</nodeIndex>
32       <initialOffTime>40</initialOffTime>
33       <endOffTime>90</endOffTime>

```

```

34     </turnOffNode>
35 </simulationProfile>
36
37     <simulationProfile>
38     <wirelessProtocol>AODV</wirelessProtocol>
39     <numberOfNodesInCluster>16</numberOfNodesInCluster>
40     <numberOfClusters>9</numberOfClusters>
41     <internalTraffic>0.2</internalTraffic>
42     <internalTrafficDesirableHopNumber>16</internalTrafficDesirableHopNumber>
43     <externalTraffic>0.7</externalTraffic>
44     <externalTrafficDesirableHopNumber>16</externalTrafficDesirableHopNumber>
45     <packetSize>512</packetSize>
46     <timeInterval>5.0</timeInterval>
47     <appThroughput>5</appThroughput>
48     <wiredBandwidth>0.25Mb</wiredBandwidth>
49     <linkDelay>0.2ms</linkDelay>
50     <wiredQueueSize>2</wiredQueueSize>
51     <wiredFileDiscriminator>simulacaoComFio</wiredFileDiscriminator>
52     <initialTime>0</initialTime>
53     <endTime>200</endTime>
54     <wirelessQueueSize>64</wirelessQueueSize>
55     <wirelessFileDiscriminator>simulacaoSemFio</wirelessFileDiscriminator>
56     <maxRelDifDeliveryRate>0.04</maxRelDifDeliveryRate>
57     <maxRelDifMeanDelay>0.05</maxRelDifMeanDelay>
58     <simulationApproach>ONLY_THROUGHPUT</simulationApproach>
59 </simulationProfile>
60
61 </simulationSchema>

```

APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE DAS ABORDAGENS DE CONVERGÊNCIA

Trecho de Código D.1: código-fonte de parte do subsistema de controle ilustrado na Figura 26. Este código-fonte detalha as abordagens de convergência da seção 4.1.4

```

1
2 package main.java;
3
4
5 import io.java.SimulationApproach;
6 import io.java.SimulationParams;
7 import io.java.TclGeneratorSimulationData;
8
9 import java.io.FileWriter;
10 import java.io.IOException;
11 import java.text.DecimalFormat;
12 import java.util.ArrayList;
13 import java.util.Collections;
14 import java.util.Comparator;
15 import java.util.HashMap;
16 import java.util.Iterator;
17 import java.util.List;
18 import java.util.Map;
19 import java.util.Map.Entry;
20 import java.util.logging.Logger;
21
22
23 /**
24  * Implements the decision process taken for stopping or continuing the simulation iterative process
25  *
26  * @author jchaves
27  */
28 public class SimulationIterator {
29
30     private static Integer maxIterations = 40;
31     private static String decFormat = "#.#####";
32     private static Float decPrecision = 0.00001f;
33     private static Float decEqPrecision = decPrecision * 10;
34     private Map<String, Integer> masterPacketCountList;
35     private List<TclGeneratorSimulationData> wiredSimulationData;
36     private List<TclGeneratorSimulationData> wirelessSimulationData;
37     private SimulationParams simulationParams;
38     private Logger log;
39     private FileWriter convergenceReport;
40     private boolean debug;
41
42     /**

```



```

43  * @param debug
44  * @param wiredSimulationData
45  * @param wirelessSimulationData
46  * @param previousParams
47  * @param convergenceReport
48  */
49  public SimulationIterator(boolean debug, List<TclGeneratorSimulationData> wiredSimulationData,
50      List<TclGeneratorSimulationData> wirelessSimulationData, SimulationParams previousParams,
51      FileWriter convergenceReport) {
52      this.wiredSimulationData = wiredSimulationData;
53      this.wirelessSimulationData = wirelessSimulationData;
54      this.simulationParams = previousParams;
55      this.log = Logger.getLogger(Main.class.getName());
56      this.convergenceReport = convergenceReport;
57      this.debug = debug;
58      this.masterPacketCountList = new HashMap<String, Integer>();
59  }
60
61  private Float fabs(Float val) {
62      if (val < 0) {
63          return -val;
64      }
65      return val;
66  }
67
68  private boolean equalsFloat(Float v1, Float v2, Float prec) {
69      Float diff = this.fabs(v1 - v2);
70      if (diff <= prec) {
71          return true;
72      }
73      return false;
74  }
75
76  private <K, V extends Comparable<? super V>> List<Entry<K, V>> entriesSortedByValues(Map<K, V> map) {
77
78      List<Entry<K, V>> sortedEntries = new ArrayList<Entry<K, V>>(map.entrySet());
79
80      Collections.sort(sortedEntries, new Comparator<Entry<K, V>>() {
81
82          @Override
83          public int compare(Entry<K, V> e1, Entry<K, V> e2) {
84              return e2.getValue().compareTo(e1.getValue());
85          }
86      });
87
88      return sortedEntries;
89  }
90
91  /**
92   * @return simulation params for the next simulation
93   * @throws IOException
94   */
95  public SimulationParams generateNewSimulationParams() throws IOException {
96
97      Iterator<TclGeneratorSimulationData> iteratorWireless = this.wirelessSimulationData.iterator();
98      Iterator<TclGeneratorSimulationData> iteratorWired = this.wiredSimulationData.iterator();
99
100     if (this.wirelessSimulationData.size() != this.wiredSimulationData.size()) {
101         throw new RuntimeException("Discrepancies between wired and wireless simulation sizes");
102     }
103
104     Float wiredSimulationDelay = 0f;
105     Float wirelessSimulationDelay = 0f;
106     Float wiredSimulationDeliveryRate = 0f;
107     Float wirelessSimulationDeliveryRate = 0f;
108     Integer numberOfNotEmptySimulations = 0;
109
110     while (iteratorWireless.hasNext() && iteratorWired.hasNext()) {
111         TclGeneratorSimulationData wirelessSimulation = iteratorWireless.next();
112         TclGeneratorSimulationData wiredSimulation = iteratorWired.next();
113

```

```

114         Float wiredDeliveryRate = wiredSimulation.getDeliveryRate();
115         Float wiredMeanDelay = wiredSimulation.getMeanDelay();
116
117         Float wirelessDeliveryRate = wirelessSimulation.getDeliveryRate();
118         Float wirelessMeanDelay = wirelessSimulation.getMeanDelay();
119
120         // for now it will be like this
121         // wirelessMeanDelay = wirelessMeanDelay/2;
122
123         if (wirelessSimulation.getThroughputData().size() != wiredSimulation.getThroughputData().size()) {
124             throw new RuntimeException("Discrepancies between wired and wireless throughput data");
125         }
126
127         // packet through node master count
128         for (Map.Entry<String, Integer> nodeCount : wirelessSimulation.getNodePacketCountData().entrySet()) {
129             Integer packetCount = this.masterPacketCountList.get(nodeCount.getKey());
130             if (packetCount == null) {
131                 this.masterPacketCountList.put(nodeCount.getKey(), nodeCount.getValue());
132             } else {
133                 this.masterPacketCountList.put(nodeCount.getKey(), packetCount + nodeCount.getValue());
134             }
135         }
136
137         // gaps among samples are not needed in calculations
138         if (!wirelessSimulation.getThroughputData().isEmpty()) {
139             wiredSimulationDelay += wiredMeanDelay;
140             wirelessSimulationDelay += wirelessMeanDelay;
141             wirelessSimulationDeliveryRate += wirelessDeliveryRate;
142             wiredSimulationDeliveryRate += wiredDeliveryRate;
143             numberOfNotEmptySimulations++;
144         } else {
145             if (this.debug) {
146                 System.out.println("gap");
147             }
148         }
149     }
150
151     String strLog = null;
152     strLog =
153         "\n=====
154             + "\nSimulation Iterator Report "
155             + "\n=====
156     this.log.info(strLog);
157     this.convergenceReport.write(strLog);
158     SimulationParams newSimulationParams = this.simulationParams.clone();
159
160     if (numberOfNotEmptySimulations > 0) {
161         wirelessSimulationDelay = wirelessSimulationDelay / numberOfNotEmptySimulations;
162         wiredSimulationDelay = wiredSimulationDelay / numberOfNotEmptySimulations;
163
164         wirelessSimulationDeliveryRate = wirelessSimulationDeliveryRate / numberOfNotEmptySimulations;
165         wiredSimulationDeliveryRate = wiredSimulationDeliveryRate / numberOfNotEmptySimulations;
166
167         Float errRelDelivery =
168             (wirelessSimulationDeliveryRate - wiredSimulationDeliveryRate) /
169             wiredSimulationDeliveryRate;
170
171         Float errRelDelay = (wirelessSimulationDelay - wiredSimulationDelay) / wiredSimulationDelay;
172         Float correctionFactorDelay = null;
173         Float correctionFactorDelivery = null;
174
175         if (this.fabs(errRelDelivery) > this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate()) {
176             strLog = "STATE: trying to balance delivery rates\n";
177             this.log.info(strLog);
178             this.convergenceReport.write(strLog);
179
180             strLog = "Tamanho erro delivery: " + this.simulationParams.getDeliveryRateError().size() + "\n";
181             this.convergenceReport.write(strLog);
182             this.log.info(strLog);

```

```

181
182         strLog = "Tamanho app throughput: " + this.simulationParams.getAppThroughputHistory().size()
183             + "\n";
184         this.convergenceReport.write(strLog);
185         this.log.info(strLog);
186
187         correctionFactorDelivery =
188             this.generateParamsToNewAppThroughputIteration(newSimulationParams, errRelDelivery);
189     } else {
190         // here we try to lower the channel width in order to balance the mean delay
191         if (this.fabs(errRelDelay) > this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay()) {
192             strLog = "STATE: trying to balance mean delays\n";
193             this.log.info(strLog);
194             this.convergenceReport.write(strLog);
195
196             strLog = "Tamanho erro delay: " + this.simulationParams.getMeanDelayError().size() + "\n"
197                 ;
198             this.convergenceReport.write(strLog);
199             this.log.info(strLog);
200             strLog = "Tamanho banda wired: " + this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory().size()
201                 + "\n";
202             this.convergenceReport.write(strLog);
203             this.log.info(strLog);
204
205             if (this.simulationParams.getSimulationApproach() == SimulationApproach.ONLY_THROUGHPUT)
206             {
207                 // change meanDelay AND appThroughput
208                 correctionFactorDelay =
209                     this.generateParamsToNewLinkDelayIteration(newSimulationParams, errRelDelay);
210             } else {
211                 // change wiredBandwidth AND appThroughput
212                 correctionFactorDelay =
213                     this.generateParamsToNewWiredBandwidthIteration(newSimulationParams,
214                         errRelDelay);
215             }
216         } else {
217             // WIN
218             strLog = "STATE: FOUND balanced parameters\n";
219             this.log.info(strLog);
220             this.convergenceReport.write(strLog);
221             newSimulationParams.setConvergedMeanDelay(wirelessSimulationDelay);
222             newSimulationParams.setConverged(true);
223         }
224     }
225     strLog =
226         "Relative error for delivery rate " + errRelDelivery + " correctionFactor "
227         + correctionFactorDelivery + "\n" + "New app throughput "
228         + newSimulationParams.getAppThroughput() + "\n" + "Relative error for mean delay "
229         + errRelDelay + " correction Factor " + correctionFactorDelay + "\n"
230         + "New wired bandwidth " + newSimulationParams.getWiredBandwidth() + "\n"
231         + "New link delay " + newSimulationParams.getLinkDelay() + "\n" + "tamWired "
232         + this.wiredSimulationData.size() + " tamWireless " + this.wirelessSimulationData
233         .size()
234         + "\n";
235
236     strLog = strLog + "\npacket count " + this.masterPacketCountList.toString() + "\n";
237
238 } else {
239     strLog = "There is no simulation data\n";
240     // it is impossible iterate nothing
241     newSimulationParams.setConverged(true);
242 }
243
244 if (newSimulationParams.getIterations() > (SimulationIterator.maxIterations - 1)) {
245     strLog = "max number of iterations achieved\n";
246     newSimulationParams.setConvergedMeanDelay(wirelessSimulationDelay);
247     newSimulationParams.setConverged(true);
248     this.log.info(strLog);
249     this.convergenceReport.write(strLog);
250 }

```

```

245
246     newSimulationParams.setIterations(newSimulationParams.getIterations() + 1);
247     this.log.info(strLog);
248     this.convergenceReport.write(strLog);
249
250     return newSimulationParams;
251 }
252
253 /**
254  * @param newSimulationParams
255  * @param errRelDelivery
256  * @return correctionFactorDelivery
257  * @throws IOException
258  */
259 private Float generateParamsToNewAppThroughputIteration(SimulationParams newSimulationParams, Float
    errRelDelivery)
260 {
261     throws IOException {
262         Float correctionFactorDelivery;
263         correctionFactorDelivery = errRelDelivery;
264         Float newAppThroughput = null;
265         Float appThroughput = this.simulationParams.getAppThroughput();
266         if (this.fabs(correctionFactorDelivery) > (4 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate())) {
267             // correction factor is too big or small
268             if (correctionFactorDelivery > 0) {
269                 correctionFactorDelivery = 4 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate();
270             } else {
271                 correctionFactorDelivery = -4 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate();
272             }
273         } else if (this.simulationParams.getDeliveryRateError().size() > 0) {
274             Integer lastErrorIndex = this.simulationParams.getDeliveryRateError().size() - 1;
275             Float lastError = this.simulationParams.getDeliveryRateError().get(lastErrorIndex);
276             Integer lastAppThroughputIndex = this.simulationParams.getAppThroughputHistory().size() - 1;
277             if (((lastError * correctionFactorDelivery) < 0) && (lastAppThroughputIndex > 0)) {
278                 Float previousAppThroughput =
279                     Float.valueOf(this.simulationParams.getAppThroughputHistory().get(
280                         lastAppThroughputIndex - 1));
281                 // errors with different signals
282                 newAppThroughput = (previousAppThroughput + appThroughput) / 2;
283                 // clean history and error history
284                 newSimulationParams.getAppThroughputHistory().clear();
285                 newSimulationParams.getDeliveryRateError().clear();
286             } else {
287                 // Float relErrorTest = (errRelDelivery - lastError) / lastError;
288                 if (this.fabs(correctionFactorDelivery) < (2 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate
289                     ())) {
290                     if (correctionFactorDelivery > 0) {
291                         correctionFactorDelivery = 2 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate();
292                     } else {
293                         correctionFactorDelivery = -2 * this.simulationParams.getMaxRelDifDeliveryRate();
294                     }
295                 }
296             }
297         }
298         DecimalFormat df = new DecimalFormat(decFormat);
299         if (newAppThroughput == null) {
300             newSimulationParams.setDeliveryRateError(correctionFactorDelivery);
301             newAppThroughput = appThroughput * (1 + correctionFactorDelivery);
302             if (this.equalsFloat(newAppThroughput, appThroughput, decEqPrecision)) {
303                 newAppThroughput = appThroughput + correctionFactorDelivery;
304             }
305             if (newAppThroughput < 0) {
306                 newAppThroughput = decPrecision;
307                 Integer listSize = this.simulationParams.getAppThroughputHistory().size();
308                 if (listSize > 1) {
309                     if ((this.simulationParams.getAppThroughputHistory().get(listSize - 1) == decPrecision)
310                         && (this.simulationParams.getAppThroughputHistory().get(listSize - 1) == this.
311                             simulationParams
312                                 .getAppThroughputHistory().get(listSize - 2))) {
313                         String strLog = "There is NO smaller value for throughput\n";
314                         this.log.info(strLog);
315                         this.convergenceReport.write(strLog);
316                     }
317                 }
318             }
319         }
320     }
321 }

```

```

312             newSimulationParams.setConverged(true);
313         }
314     }
315 }
316 }
317 String strNewAppThroughput = df.format(newAppThroughput);
318 newSimulationParams.setAppThroughput(Float.valueOf(strNewAppThroughput));
319 return correctionFactorDelivery;
320 }
321
322 private Float generateParamsToNewLinkDelayIteration(SimulationParams newSimulationParams, Float
    errRelDelay)
323     throws IOException {
324     Float correctionFactorLinkDelay;
325     correctionFactorLinkDelay = errRelDelay;
326     Float newLinkDelay = null;
327     Float linkDelay =
328         Float.valueOf(this.simulationParams.getLinkDelay().substring(0,
329             this.simulationParams.getLinkDelay().length() - 2));
330     if (this.fabs(correctionFactorLinkDelay) > (4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay())) {
331         // correction factor is too big or small
332         if (correctionFactorLinkDelay > 0) {
333             correctionFactorLinkDelay = 4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
334         } else {
335             correctionFactorLinkDelay = -4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
336         }
337     } else if (this.simulationParams.getMeanDelayError().size() > 0) {
338         Integer lastErrorIndex = this.simulationParams.getMeanDelayError().size() - 1;
339         Float lastError = this.simulationParams.getMeanDelayError().get(lastErrorIndex);
340         Integer lastLinkDelayIndex = this.simulationParams.getLinkDelayHistory().size() - 1;
341         if ((lastError * correctionFactorLinkDelay) < 0) && (lastLinkDelayIndex > 0) {
342
343             Float previousLinkDelay =
344                 Float.valueOf(this.simulationParams
345                     .getLinkDelayHistory()
346                     .get(lastLinkDelayIndex - 1)
347                     .substring(
348                         0,
349                         this.simulationParams.getLinkDelayHistory().get(lastLinkDelayIndex -
350                             1)
351                             .length() - 2));
352             // errors with different signals
353             newLinkDelay = (previousLinkDelay + linkDelay) / 2;
354             // clean history and error history
355             newSimulationParams.getLinkDelayHistory().clear();
356             newSimulationParams.getMeanDelayError().clear();
357         } else {
358             if (this.fabs(correctionFactorLinkDelay) < (2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay(
359                 ))) {
360                 if (correctionFactorLinkDelay > 0) {
361                     correctionFactorLinkDelay = 2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
362                 } else {
363                     correctionFactorLinkDelay = -2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
364                 }
365             }
366         }
367     }
368     DecimalFormat df = new DecimalFormat(decFormat);
369     if (newLinkDelay == null) {
370         newSimulationParams.setDeliveryRateError(correctionFactorLinkDelay);
371         newLinkDelay = linkDelay * (1 + correctionFactorLinkDelay);
372         if (this.equalsFloat(newLinkDelay, linkDelay, decEqPrecision)) {
373             newLinkDelay = linkDelay + correctionFactorLinkDelay;
374         }
375     }
376     if (newLinkDelay < 0) {
377         newLinkDelay = decPrecision;
378         Integer listSize = this.simulationParams.getLinkDelayHistory().size();
379         if (listSize > 1) {
380             if ((this.simulationParams.getLinkDelayHistory().get(listSize - 1) == (decPrecision + "ms
381                 ")))

```

```

378         && (this.simulationParams.getLinkDelayHistory().get(listSize - 1) == this.
simulationParams
379             .getLinkDelayHistory().get(listSize - 2))) {
380             String strLog = "There is NO smaller value for linkDelay\n";
381             // TODO: implement the case to low throughput if wired simulation is slower than
wireless
382             this.log.info(strLog);
383             this.convergenceReport.write(strLog);
384             newSimulationParams.setConverged(true);
385         }
386     }
387 }
388 }
389 String newStrLinkDelay = df.format(newLinkDelay);
390 newSimulationParams.setLinkDelay(newStrLinkDelay + "ms");
391 return correctionFactorLinkDelay;
392 }
393
394 /**
395  * @param newSimulationParams
396  * @param errRelDelay
397  * @return correctionFactorDelay
398  * @throws IOException
399  */
400 private Float generateParamsToNewWiredBandwidthIteration(SimulationParams newSimulationParams, Float
errRelDelay)
401     throws IOException {
402     Float correctionFactorDelay = errRelDelay;
403     Float newWiredBandwidth = null;
404     Float wiredBandwidth =
405         Float.valueOf(this.simulationParams.getWiredBandwidth().substring(0,
406             this.simulationParams.getWiredBandwidth().length() - 2));
407     if (this.fabs(correctionFactorDelay) > (4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay())) {
408         // correction factor is too big or small
409         if (correctionFactorDelay > 0) {
410             correctionFactorDelay = 4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
411         } else {
412             correctionFactorDelay = -4 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
413         }
414     } else if (this.simulationParams.getMeanDelayError().size() > 0) {
415         // has history data
416         Integer lastErrorIndex = this.simulationParams.getMeanDelayError().size() - 1;
417         Float lastError = this.simulationParams.getMeanDelayError().get(lastErrorIndex);
418         Integer lastWiredBandWidthIndex = this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory().size() - 1;
419         if ((lastError * correctionFactorDelay) < 0) && (lastWiredBandWidthIndex > 0) {
420             Float previousWiredBandwidth =
421                 Float.valueOf(this.simulationParams
422                     .getWiredBandwidthHistory()
423                     .get(lastWiredBandWidthIndex - 1)
424                     .substring(
425                         0,
426                         this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory()
427                             .get(lastWiredBandWidthIndex - 1).length() - 2));
428             // errors with different signals
429             newWiredBandwidth = (previousWiredBandwidth + wiredBandwidth) / 2;
430             // clean history and error history
431             newSimulationParams.getWiredBandwidthHistory().clear();
432             newSimulationParams.getMeanDelayError().clear();
433         } else {
434             // the error difference is too small
435             if (this.fabs(correctionFactorDelay) < (2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay())) {
436                 if (errRelDelay > 0) {
437                     correctionFactorDelay = 2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
438                 } else {
439                     correctionFactorDelay = -2 * this.simulationParams.getMaxRelDifMeanDelay();
440                 }
441             }
442         }
443     }
444     DecimalFormat df = new DecimalFormat(decFormat);
445     if (newWiredBandwidth == null) {

```

```

446         newSimulationParams.setMeanDelayError(correctionFactorDelay);
447         newWiredBandwidth = (wiredBandwidth * (1 - correctionFactorDelay));
448         if (this.equalsFloat(wiredBandwidth, newWiredBandwidth, decEqPrecision)) {
449             newWiredBandwidth = wiredBandwidth - correctionFactorDelay;
450         }
451         if (newWiredBandwidth < 0) {
452             newWiredBandwidth = decPrecision;
453             Integer listSize = this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory().size();
454             if (listSize > 1) {
455                 if ((this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory().get(listSize - 1) == (decPrecision
456                     + "Mb"))
457                     && (this.simulationParams.getWiredBandwidthHistory().get(listSize - 1) == this.
458                         simulationParams
459                             .getWiredBandwidthHistory().get(listSize - 2))) {
460                     String strLog = "There is NO smaller value for wiredBandwidth\n";
461                     this.log.info(strLog);
462                     this.convergenceReport.write(strLog);
463                     newSimulationParams.setConverged(true);
464                 }
465             }
466         }
467         String strNewWiredBandWidth = df.format(newWiredBandwidth);
468         newSimulationParams.setWiredBandwidth(strNewWiredBandWidth + "Mb");
469         return correctionFactorDelay;
470     }
471     /**
472      * @return simulationParams
473      */
474     public SimulationParams getNewSimulationParams() {
475         return this.simulationParams;
476     }
477
478     /**
479      * @return list of {@link TclGeneratorSimulationData} from the wired simulation
480      */
481     public List<TclGeneratorSimulationData> getWiredSimulationData() {
482         return this.wiredSimulationData;
483     }
484
485     /**
486      * @param wiredSimulationData
487      */
488     public void setWiredSimulationData(List<TclGeneratorSimulationData> wiredSimulationData) {
489         this.wiredSimulationData = wiredSimulationData;
490     }
491
492     /**
493      * @return list of {@link TclGeneratorSimulationData} from the wireless simulation
494      */
495     public List<TclGeneratorSimulationData> getWirelessSimulationData() {
496         return this.wirelessSimulationData;
497     }
498
499     /**
500      * @param wirelessSimulationData
501      */
502     public void setWirelessSimulationData(List<TclGeneratorSimulationData> wirelessSimulationData) {
503         this.wirelessSimulationData = wirelessSimulationData;
504     }
505 }

```